



**Ana Rita Casinhas
Ferreira**

Sistemas de Ventilação por Tubos Enterrados



**Ana Rita Casinhas
Ferreira**

Sistemas de Ventilação por Tubos Enterrados

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

“Everything you can imagine is real”

Pablo Picasso

À minha família
Aos meus amigos

O júri/ The jury

Presidente/President

Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho

Professor auxiliar do Departamento de Ambiente e Ornamento da Universidade de Aveiro

Vogais/Committee

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins

Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
(orientador)

Prof. Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues

Professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Palavras-chave

NZEB, AVAC, DesignBuilder, Tubos Enterrados

Resumo

A problemática energética e o excessivo consumo de combustíveis fósseis, tem levado a uma maior procura de soluções com vista à redução destes consumos. Como tal, sendo o sector dos edifícios responsável pelo consumo de 40% de toda a energia mundial, é um dos sectores de actividade onde é fundamental actuar rapidamente e daí a importância dos “NZEB- Near Zero Energy Buildings”.

Neste sentido surge investigação e novos métodos para conseguir alcançar esta tipologia de edifício, e surge então os Sistemas de Ventilação por Tubos Enterrados. Estes sistemas permitem uma climatização sustentável, não havendo assim necessidade de consumo de energia por parte do mesmo. Nesta dissertação foi validada, através da comparação com dados experimentais e Benchmarking, uma ferramenta de análise do desempenho dos tubos enterrados disponibilizado no software DesignBuilder. Conseguiu-se uma validação com um erro inferior a 10% para todos os casos de estudo, o que revela uma boa correlação entre os resultados. Após a validação, foi realizado um estudo para três cidades em Portugal, nomeadamente Bragança, Porto e Beja de forma a perceber qual seria o desempenho de um sistema de tubos enterrados nas mesmas. Foram realizadas várias simulações, para três tipos de sistemas: AVAC, Tubos enterrados e AVAC+Tubos enterrados. Este último revelou o consumo mais baixo para a cidade de Beja (24254,20 Kwh/ano) sendo também onde o sistema revela melhores resultados conseguindo suprir as necessidades de arrefecimento. Conclui-se então que a utilização de tubos enterrados é viável e que será mais eficaz para climas quentes na estação de arrefecimento.

Keywords

NZEB, HVAC, DesignBuilder, Earth Tubes

Abstract

The energy problem and excessive consumption of fossil fuels has led to a greater demand for solutions to reduce these consumption. As such, since the building sector accounts for 40% of all world energy consumption, it is one of the sectors of activity where it is essential to act quickly and hence the importance of "NZEB- Near Zero Energy Buildings".

In this sense arises research and new methods to achieve this type of building, and then the Systems of Ventilation by earth tubes. These systems allow a sustainable air conditioning, so there is no need for energy consumption. This dissertation was validated through the comparison of experimental data and Benchmarking with a tool of analysis of the performance of earth tubes available in the software DesignBuilder. A validation with an error of less than 10% was obtained for all the study cases, which shows a good correlation between the results. After validation, a study was carried out for three cities in Portugal, namely Bragança, Porto and Beja in order to perceive the performance of earth tubes in these locations. Several simulations were performed for three types of systems: HVAC, earth tubes and HVAC + earth tubes. This last one showed the lowest consumption for the city of Beja (24254.20 kwh / year) and also where the system shows better results to meet the cooling needs. It is then concluded that the use of earth tubes is effective and will be most effective for hot climates in the cooling season.

Índice

Lista de Ilustrações	3
Lista de Tabelas	6
Lista de Símbolos.....	7
Lista de Acrónimos	9
Capítulo 1.....	11
1.Introdução	13
1.1 Enquadramento.....	13
1.2 Objetivo Geral	24
1.3 Estado da Arte	24
1.3.1 Modelação.....	25
1.3.2Casos de Estudo e dados experimentais.....	27
1.3.3 Configuração	30
1.3 Contributo da Dissertação.....	32
1.4 Estrutura da Dissertação	33
1.5 Conclusão	33
Capítulo 2.....	35
2. Modelação.....	37
2.1 Caracterização do <i>Software</i> EnergyPlus.....	38
2.2 Caracterização do <i>Software</i> DesignBuilder	42
2.3 Caracterização do Modelo EarthTube do EnergyPlus	44
2.4 Conclusão	51
Capítulo 3.....	53
3. Processo de Validação.....	55
3.1 Estratégia de Validação	55
3.2 Análise de Sensibilidade do Modelo	56
3.3 Validação por comparação com dados experimentais	62
3.3 Conclusão	85

Capítulo 4.....	87
4. Simulação de um sistema de tubos enterrados em cidades de Portugal	89
4.1 Caracterização do Clima em Portugal	89
4.2 Simulação do sistema de tubos enterrados	93
4.3 Conclusão	103
Capítulo 5.....	106
5. Considerações Finais e Trabalhos Futuros	108
5.1 Considerações Finais	108
Referências Bibliográficas	112

Lista de Figuras

Figura 1: Consumo total de energia em 2014	14
Figura 2: Distribuição de consumos de energia em edifícios por tipo de equipamento	15
Figura 3: Impacto das Energias Renováveis na produção de eletricidade	16
Figura 4: Diagrama do Enquadramento Legislativo em Portugal.....	20
Figura 5: Princípio de Funcionamento de um Sistema Aberto de Tubos Enterrados	23
Figura 6: Configurações de tubos enterrados (a) Série, b) Paralelo, c) Andares, d) Irregular)	31
Figura 7: Configurações tubulares para tubos enterrados	32
Figura 8: Interface de abertura do Software EnergyPlus	38
Figura 9: Estrutura de funcionamento do EnergyPlus	39
Figura 10: Interface de entrada do DesignBuilder	43
Figura 11: Hierarquia de dados do DesignBuilder.....	43
Figura 12: Interface de entrada do Modelo EarthTube através dos <i>software</i> DesignBuilder	44
Figura 13: Interface do programa <i>CalcSoilSurfTemp</i> do EnergyPlus.....	45
Figura 14: Célula de teste proposta para a análise de sensibilidade	57
Figura 15: Variação da temperatura na cidade de Bragança para o dia 21 de Agosto de 2002	57
Figura 16: Painel do módulo “Earthtube” para a simulação do da célula modelo	58
Figura 17: Variação do raio do tubo ao longo de um ano.....	60
Figura 18: Variação da espessura do tubo para um dia típico de Verão	60
Figura 19: Variação do comprimento do tubo para um dia típico de Verão	61
Figura 20: Variação dos tipos de materiais do tubo para um dia típico de Verão.....	61
Figura 21: Variação da profundidade do tubo para um dia típico de Verão.....	62
Figura 22: Representação geográfica do local do modelo de estudo, Universidade de Salahaddin, Arbil, Iraque.....	62
Figura 23: Modelo do Quarto de teste do estudo experimental	63
Figura 24: Quarto de teste no software de simulação DesignBuilder	65
Figura 25: Localização geográfica de Hama e Arbil.....	65
Figura 26: Dados requeridos pelo modelo EarthTube no software EnergyPlus	67
Figura 27: Variação da temperatura interior do espaço às 03h obtida pelo modelo experimental	69
Figura 28: Variação da temperatura interior do espaço às 15h obtida pelo modelo experimental	70
Figura 29: Imagem de satélite da cidade de Key West	70

Figura 30: Representação das condições climáticas anuais na cidade de Key West, Flórida	71
Figura 31: Comparação da temperatura interior da sala de teste com tubos e sem tubos	73
Figura 32: Layout do edifício simulado, Key West, Florida	73
Figura 33: Layout descritivo do separador de “EarthTubes” utilizado no modelo	74
Figura 34: Comparação da temperatura interior da sala de teste com e sem tubos para o modelo simulado no DesignBuilder	75
Figura 35: Cidade de Bhopal, India vista por imagem satélite	76
Figura 36: Variação anual da precipitação e temperatura para a cidade de Bhopal, India	76
Figura 37: Setup experimental do sistema de tubos enterrados instalado na cidade de Bhopal, India Cental	77
Figura 38: Célula teste usada para o estudo de simulação no DesignBuilder	78
Figura 39: Layout de utilização do modulo “EarthTube” do DesignBuilder.....	79
Figura 40: Variação da temperatura de saída dos tubos simulada e experimental	80
Figura 41: Região de Riyadh vista por satélite	81
Figura 42: Variação da temperatura e precipitação média anual na cidade de Riyadh	81
Figura 43: Protótipo utilizado para o caso de estudo	82
Figura 44: Variação anual da temperatura de entrada e saída dos tubos em Riyadh	84
Figura 45: Modelo Virtual criado no DesignBuilder para o processo de simulação	84
Figura 46: Variação da temperatura de entrada e saída dos tubos para a cidade de Riyadh pelo DesignBuilder	85
Figura 47: Clima de Portugal Continental, segundo a classificação de Koppen.....	90
Figura 48: Temperatura média anual.....	91
Figura 49: Precipitação acumulada anual	92
Figura 50: Carta de solos de Portugal segunda a classificação FAO	92
Figura 51: Variação da precipitação e temperatura ao longo do ano em Bragança.....	97
Figura 52: Consumo anual de energia de um sistema de AVAC + Tubos na cidade de Bragança ...	97
Figura 53: Consumo anual de energia de um sistema de AVAC + Tubos na cidade de Bragança ...	98
Figura 54: Variação da Temperatura e precipitação media anual na cidade de Porto.....	99
Figura 55: Variação da Temperatura interior na cidade de Porto	99
Figura 56: Consumo de energia ao longo de um ano para a cidade do Porto.....	100
Figura 57: Variação da temperatura e precipitação média anual.....	101
Figura 58: Variação da temperatura interior ao longo do ano	102
Figura 59: Consumo de energia pelo sistema AVAC + tubos na cidade de Beja	102

Figura 60: Variação da temperatura diária no interior do edifício modelo	103
--	-----

Lista de Tabelas

Tabela 1: Definição de conceitos ZEB.....	21
Tabela 2: Modelos Analíticos Propostos para o desempenho dos tubos enterrados	26
Tabela 3: Modelos Numéricos Propostos para o desempenho dos tubos enterrados.....	27
Tabela 4: Estudos Experimentais com tubos enterrados, para o sector dos edifícios.....	27
Tabela 5: Estudos Experimentais com tubos enterrados em estufas	28
Tabela 6: Condutividade e difusidade térmica do solo para diferentes condições	47
Tabela 7: Propriedades Térmicas do Solo	59
Tabela 11: Comparação do Climas de Erbil (Iraque) e Hama (Síria).....	66
Tabela 12: Setpois de Setbacks de aquecimento e arrefecimento definidos	66
Tabela 13: Características dos sistemas de setup experimental	77
Tabela 14: Modelo da Célula de Teste desenvolvido através do softwareDesignBuilder	93
Tabela 15: Opções construtivas da célula de teste	94
Tabela 16: Setpoint e Setback de aquecimento e arrefecimento do edifício modelo.....	95

Lista de Símbolos

T_{ma}	Temperatura média do ar
T_m	Temperatura media da superfície do solo
A_s	Temperatura da superfície do solo
t_0	Constante de fase da superfície do solo
Φ_s	<i>Diferença do ângulo de fase entre o ar e a temperatura da superfície do solo</i>
U	<i>Viscosidade cinética do ar</i>
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção para a superfície interior do tubo
V_a	Velocidade média do ar para as condutas
ach	<i>Renovações de ar por hora</i>
m	<i>Caudal massico</i>
v	<i>Caudal volumico</i>
ρ	<i>Densidade</i>
Q	<i>Potência requerida</i>
C_p	<i>Poder calorífico</i>
Δt	<i>Variação da temperatura</i>
T_i	<i>Temperatura interior</i>
T_e	<i>Temperatura exterior</i>
T_{va}	Amplitude da temperatura do ar
T_{0a}	Constante de fase do ar
S_v	<i>Amplitude da radiação solar</i>
φ_l	Ângulo de fase entre a insolação e a temperatura do ar
w	Frequência angular anual
α_s	<i>Difusividade térmica</i>
k_s	<i>Condutividade</i>
S_m	Radiação média solar
f	Fracção da taxa de evaporação
ΔR	Constante de radiação
E_{design}	Vazão de ar dentro do tubo
$F_{schedule}$	Agenda de tarefas que modifica a vazão no tubo
A	Constante térmica do solo

- B Diferença de temperatura entre as temperaturas de bulbo seco do ar interior e exterior
- C Velocidade do vento no exterior do edifício
- D Quadrado da velocidade do vento no exterior do edifício
- WindSpeed* Velocidade do ar no tubo

Lista de Acrónimos

NZEB	<i>Near Zero Energy Buidings</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
EAHE	<i>Earth to Air Heat Exchanger</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
FER	Fontes de Energia Renováveis
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos e Climatização de Edifícios
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comercio e Serviços
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>

Capítulo 1

Introdução

1.Introdução

Resumo do Capítulo

Neste capítulo é iniciada uma abordagem aos sistemas de ventilação passiva, debruçando-se principalmente sobre os sistemas de tubos enterrados. Neste sentido, é feita uma análise à literatura de forma a perceber aquilo que já se fez nesta área e o que ainda há por fazer. São também definidos os objectivos para esta dissertação e contribuição da mesma. Conclui-se com referência à estrutura que foi definida.

1.1 Enquadramento

1.1.1 Problemática Energética Global

O panorama energético mundial está em constante mudança, quer por força da economia, directamente ligada à procura de energia, que por força das alterações climáticas que nos obrigam a uma opção imediata para travar a escala das emissões de Gases com Efeito de Estufa. Actualmente a gestão dos recursos de energia é um dos principais desafios ao nível mundial que a sociedade moderna enfrenta. Nas últimas décadas, o desenvolvimento económico caracterizou-se por uma utilização intensiva de energia produzida a partir de recursos de origem fóssil, recursos esses que possuem uma natureza finita para além de um grave impacto ambiental aquando da sua produção e consumo. Também as evidências da globalização demonstram a interdependência de factores que até então seriam olhados como independentes, tais como o acesso e a utilização de energia e desenvolvimento económico, o combate à pobreza e as preocupações ambientais e climáticas, entre outros. Todos estes factores alertam para a necessidade de mudança das premissas em que assenta o modelo de desenvolvimento. É necessário encontrar um novo caminho de forma a viabilizar a manutenção dos padrões de vida das sociedades desenvolvidas e ir de encontro às aspirações dos países em desenvolvimento, uma vez que a este ritmo a escassez de recursos não renováveis será cada vez maior e é fulcral proteger o futuro de todo o planeta assim como das próximas gerações [1].

Este tema tem sido então motivo de investigação, debate e preocupação perante instituições governamentais, como o IPCC, ou comissões políticas como a Comissão Europeia. O desafio é enorme e a solução de longo prazo, mas no curto e médio prazo, a acção tem de passar pela consciencialização da população para a importância da eficiência energética e para a mudança de comportamentos. As sociedades devem adaptar-se a medidas que permitam a atenuação dos consumos de energia, assim como todos os sectores actantes quer nos países desenvolvidos e quer nos países em vias de desenvolvimento, têm que ter presente a extrema importância que tem reduzir as suas necessidades energéticas colmatando as mesmas com fontes de energias renováveis e com a utilização mais eficiente das energias disponíveis [2]. Como se pode verificar na Figura 1, no ano de 2014 os maiores consumos de energia foram praticados pelas grandes potências mundiais e destacaram-se de forma muito significativa dos restantes países. Na China e nos Estados Unidos rondaram os valores de 3,034 Mtoe (35.285420 GWh) e 2,224 Mtoe (25.865120 GWh) respectivamente, o que significa que só a China consumiu cerca de 55% da energia do continente asiático, assim como os Estados Unidos consumiram cerca de 90% da energia do continente norte-americano. No entanto, é de salientar que apesar dos elevados consumos, a China neste último ano não aumentou o mesmo, o que não acontecia desde 1997. Como menores consumidores destacaram-se a Nova Zelândia e Portugal, com 21 Mtoe (24.4230 GWh) e 22 Mtoe (25.5860 GWh) respectivamente.



Figura 1: Consumo total de energia em 2014 [3]

De entre estes consumos de energia, o sector da energia eléctrica é o que representa maior procura devido à sua importância fulcral em todos os sectores de actividade. Neste sector também as grandes potências mundiais se destacam, sendo que em 2014 a China consumiu cerca de 57 % da energia eléctrica de todo o continente asiático e os Estados Unidos cerca de 88 % de todo o continente norte-americano. Ao contrário do que se pretende, os cenários futuros prevêem que com o aumento das tecnologias (internet, material electrónico, etc..) e elevados padrões de vida que a sociedade utiliza, levem a um aumento das necessidades energéticas.

O caso do sector dos edifícios é responsável pelo consumo de 40 % de toda a energia mundial e prevê-se que até 2040, 85 % do consumo dessa energia seja em electricidade. Este sector é um forte consumidor energético e por isso mesmo representa a chave para um futuro sustentável. É importante referir, que ao contrário do que pode ser a percepção comum, não é no momento da construção que o edifício despende maiores recursos em termos de impacto ambiental, essa fracção é apenas 12 % do total. Pelo contrário, a energia que é gasta na utilização de um edifício, representa cerca de 84 % do total utilizado ao longo do seu ciclo de vida, conforme se pode ver na Figura 2 [4].

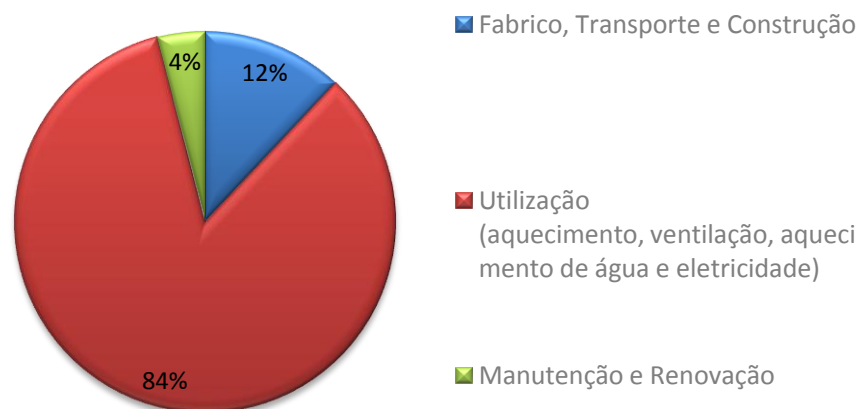


Figura 2: Distribuição de consumos de energia em edifícios ao longo do ciclo de vida

Dentro do consumo de energia relativo ao período de manutenção, as estatísticas apontam para que a maior percentagem seja gasta em aquecimento, arrefecimento e ventilação (HVAC, 37 %), realçando a importância de proteger os edifícios contra o frio e calor, quando são construídos, e de na sua vida do dia-a-dia serem adoptadas práticas de redução de utilização de

equipamentos de aquecimento e arrefecimento. A segunda maior parcela é a iluminação (18 %), demonstrando a relevância de ser maximizado o uso de iluminação natural, mais agradável para os ocupantes e benéfica para a saúde e de diminuir tanto quanto possível a utilização de luz artificial [4].

Relativamente ao panorama nacional, Portugal à semelhança de toda a União Europeia e do resto do mundo vive um clima económico com implicações directas no consumo de energia e exemplo disso é a redução em 6 % do consumo de energia primária e de 14,3 % no consumo de energia final em 2013. O território nacional possui escassos recursos endógenos (petróleo, carvão e gás natural), o que representa uma dependência energética do exterior de cerca de 73,9 % [5]. Esta dependência tem vindo a diminuir desde o ano de 2005 (onde apresentava um valor de 88,8 %) devido ao aumento da contribuição das energias renováveis, onde tem alcançado resultados bastante positivos comparativamente com a Europa e com o panorama mundial, como é possível verificar na Figura 3 [3].

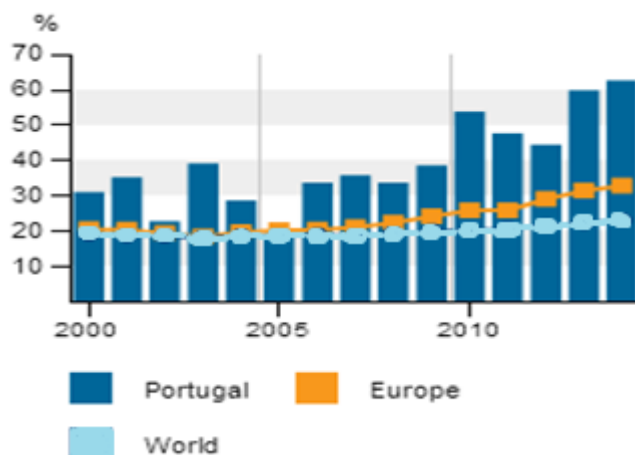


Figura 3: Impacto das Energias Renováveis na produção de electricidade [3]

Em 2013 a produção total bruta de electricidade foi de 54.448 GWh, verificando uma redução de 0,1 % face a 2012. Desta produção 59,8 % teve origem em fontes de energia renováveis, com maior incidência na hídrica e eólica. Já o consumo rondou os 46.272 GWh (25,6 %), o que configura uma redução de 1,8 % relativamente a 2012. Este consumo foi repartido pelos vários sectores de actividade, o que revelou que o sector com maior consumo é o dos edifícios com cerca de 60 % de consumo de electricidade (34 % relativos ao sector dos serviços e 26 % relativos ao sector doméstico), face ao sector da indústria, agricultura e pescas e transportes (que

representa 37 %, 2 % e 1 %, respectivamente, do consumo energético). Estes dados reforçam a necessidade de uma utilização racional da energia no sector dos edifícios, pois esta será a questão chave para o aumento da eficiência energética de todas as suas operações adjacentes, o que é imprescindível para se alcançar um novo modelo de desenvolvimento, tanto pela diminuição da intensidade energética global, como pelo aumento dos correspondentes resultados económicos [5].

1.1.2 Enquadramento Legislativo

Devido à sequência das crises petrolíferas na Europa na década de 70 do século XX, a grande maioria dos países Europeus decidiu implementar medidas de regulamentação no seguimento das medidas promulgadas pela Comissão Europeia (CE) e Parlamento Europeu (PE), com o objectivo de alcançarem uma redução do consumo energético, em particular nos sectores da indústria e dos edifícios. Destacam-se nesta época, as Resoluções do Conselho de 9 de Julho de 1980 e de 15 de Janeiro de 1985, que pretendiam intensificar na comunidade os esforços para economizar energia e reduzir o consumo e as importações de petróleo e recomendar aos Estados-membros linhas de orientação de um programa de base com vista a alcançar estes objectivos. Com o grande aumento das emissões de CO₂, na década seguinte as questões ambientais ganharam um forte impulso, surgindo uma maior consciencialização por parte da população para a problemática do efeito de estufa e consequente aquecimento global. Pensando-se numa diminuição destas emissões através da eficácia energética nos edifícios, é imposta a Directiva Europeia (93/76/CE) de 13 de Setembro de 1993 que permitia a etiquetagem dos mesmos. Foram também impostas restrições relativamente à melhoria em termos ambientais, sendo de realçar a Directiva Europeia (94/3093) de 15 de Setembro 1994, relativa às substâncias nocivas para a camada de ozono, que consistiam em tomar medidas de prevenção por forma a evitar fugas das substâncias dos equipamentos, promover recolha para a reciclagem ou distribuição de forma segura das referidas substâncias, abolição de algumas e substituição por outras ambientalmente mais seguras [6].

Em 2001, a Comissão Europeia avançou com a diretiva 2002/91/CE de 16 de dezembro de 2002, sobre o Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD), que posteriormente foi publicada pela União Europeia a 4 de janeiro de 2003 e em que, entre outros requisitos, impunha aos estados-membros o estabelecimento e actualização periódica de regulamentos para melhorar o comportamento térmico dos edifícios novos e reabilitados, obrigando-os a exigir a

implementação de todas as medidas pertinentes com viabilidade técnica e económica. Adoptou também a obrigatoriedade da contabilização das necessidades de energia para a preparação das águas quentes sanitárias, numa óptica de consideração de todos os consumos de energia importantes, sobretudo na habitação, com um objectivo específico de favorecimento da penetração dos sistemas de colectores solares ou outras alternativas renováveis. Esta Directiva vem ser reformulada pela Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 onde são clarificados alguns princípios da antiga e introduzidas novas mudanças que reforçam a necessidade de apostar no desempenho energético nos edifícios, baseando-se nas metas e desafios comuns acordados pelos Estados - Membros para os horizontes temporais de 2020 a 2050. Destacam-se a abolição do limite de 1000 m² para a aplicação dos regulamentos em casos de grandes remodelações, a intensificação dos processos de inspecção e da qualidade dos certificados energéticos emitidos, a obrigatoriedade de em 2020 todos os novos edifícios apresentarem um balanço energético próximo do zero, sendo o seu consumo coberto por fontes de energia renovável, e a atribuição de uma maior responsabilidade ao sector público, que deve servir de exemplo na aplicação dos regulamentos e ainda que os requisitos mínimos tenham em conta as poupanças nos consumos de energia durante toda a vida do edifício. Neste contexto surge a obrigatoriedade de todos os edifícios novos se tornarem NZEB (Edifício Próximo da Energia Zero) até 31 de Dezembro de 2020, e para edifícios do estado até 31 de Dezembro de 2018 [7].

Quanto a Portugal a regulamentação relativa aos edifícios começou com o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) de 1990, relativo ao Decreto-Lei nº 40/90 de 6 de Fevereiro, onde se deu um primeiro passo para introduzir os aspectos térmicos/energéticos no processo de projecto e permitiu também o conforto térmico com redução das necessidades energéticas [8]. Foi benéfico introduzir requisitos mínimos para a envolvente, coeficientes de transmissão térmica máximos para minimizar condensações interiores e sombreamentos mínimos para evitar sobreaquecimentos significativos no Verão. O RCCTE foi o primeiro Regulamento Europeu com requisitos obrigatórios para a estação quente, todos os outros eram relativos ao isolamento térmico para estações frias. Posteriormente no seguimento da transposição da Directiva 2002/91/CE a 26 de Janeiro de 2006 foram aprovados os seguintes diplomas:

- Decreto-Lei 78/2006, de 4 de Abril, que aprova o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) e transpõe

parcialmente para a ordem jurídica nacional a Directiva 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro de 2002, relativa ao desempenho energético dos edifícios;

- Decreto-Lei 79/2006, de 4 de Abril, que aprova o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios (RSECE);
- Decreto-Lei 80/2006, de 4 de Abril, que aprova o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).

O RSECE veio definir um conjunto de requisitos aplicáveis a edifícios de serviços e de habitação dotados de sistemas de climatização, os quais, para além dos aspectos relacionados com a envolvente e da limitação dos consumos energéticos, abrangem também a eficiência e manutenção de sistemas de climatização dos edifícios, impondo a realização de auditorias energéticas periódicas aos edifícios de serviços [9]. Quanto ao RCCTE, este regulamento estabelece requisitos de qualidade para os novos edifícios de habitação e de pequenos edifícios de serviços sem sistemas de climatização, nomeadamente ao nível das características da envolvente, limitando as perdas térmicas e controlando os ganhos solares excessivos. Este regulamento impõe limites aos consumos energéticos para climatização e produção de águas quentes, num claro incentivo à utilização de sistemas eficientes e de fontes energéticas com menos impacto em termos de energia primária. Esta legislação impõe a instalação de painéis solares térmicos e valoriza a utilização de outras fontes de energia renovável [10]. Finalmente o SCE estabelece que os Estados-Membros da União Europeia devem implementar um sistema de certificação energética de forma a informar o cidadão sobre a qualidade térmica dos edifícios, aquando da construção, da venda ou do arrendamento dos mesmos, exigindo também que o sistema de certificação abranja igualmente todos os grandes edifícios públicos e edifícios frequentemente visitados pelo público [11].

A transposição para o direito nacional da Directiva nº 2010/31/EU, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Maio de 2010, gerou a oportunidade de melhorar a sistematização e o âmbito de aplicação do sistema de certificação energética e respectivos regulamentos, bem como de alinhar os requisitos nacionais às imposições explicitamente decorrentes da mesma. Assim, o Decreto-Lei nº 118/2010 assegura não só a transposição da directiva em referência, mas também uma revisão da legislação nacional, que se consubstancia em melhorias ao nível da sistematização e âmbito de aplicação ao incluir, num único diploma, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético

dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), atendendo, simultaneamente, aos interesses inerentes à aplicabilidade integral e utilidade deste quadro legislativo, e aos interesses de simplificação e clareza na produção legislativa de carácter predominantemente técnico [12]. Assim sendo algumas das novas medidas com mais impacto são a introdução do conceito de custo/benefício na óptica de custo de ciclo de vida alargado dos edifícios, a exigência de um consumo energético próximo de zero nos novos edifícios em 2020 e a compreensão de que o desempenho energético não se alcança visando apenas os novos edifícios, e de que a acção deve também ser levada ao parque existente. Entretanto com estas alterações foram redefinidas metas portuguesas, determinando novos objectivos para a política energética nacional para 2020:

- Garantir em 2020, 60% do consumo de electricidade de origem renovável;
- Reduzir a dependência energética para cerca de 74%;
- Garantir em termos nacionais 31% da energia necessária.

A política nacional para as Fontes de Energias Renováveis (FER) procura aproveitar as sinergias resultantes da articulação das estratégias para a procura e oferta de energia, como principal objectivo colocar a energia ao serviço da economia e das famílias, garantindo em simultâneo a sustentabilidade de preços. Assim sendo foi estabelecido em Portugal para o horizonte de 2020, um objectivo geral de redução no consumo de energia primária de 25 % e um objectivo específico para a Administração Pública de menos 30 % [13].

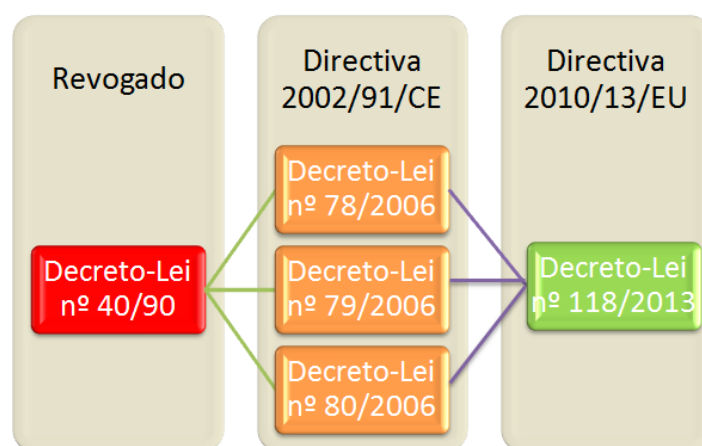


Figura 4: Diagrama do Enquadramento Legislativo em Portugal

1.1.3 Edifício Próximo da Energia Zero (nZEB)

Não é fácil indicar qual terá sido o primeiro edifício *Zero Energy/Emissions Buildings (ZEB)*, pois não se trata de um conceito recente, apenas de uma denominação consensualizada. No entanto é importante distinguir claramente os conceitos que devolvem esta tendência construtiva, considerando diversos aspectos tais como, os objectivos do projecto, as intenções do investidor, as preocupações climáticas, a emissão de gases com efeito de estufa e o custo final da energia. No Tabela 1 é possível analisar estes conceitos com maior pormenor [14].

Tabela 1: Definição de conceitos ZEB

Designação	Definição
<i>Net Zero Site Energy</i>	Produção de pelo menos tanta energia (de origem renovável) quanto a que é consumida ao longo de um ano (energia contabilizada localmente).
<i>Net Zero Source Energy</i>	Produção de energia em quantidade suficiente para compensar as necessidades ao longo de um ano (contabilização efectuada na fonte). “Source Energy” refere-se à energia primária requerida para a produção de energia útil utilizada no local com a aplicação dos devidos factores de conversão.
<i>Net Zero Energy Costs</i>	Produção e consequente venda da energia produzida em quantidade suficiente para compensar os custos associados à aquisição de energia necessária para a utilização do edifício ao longo de um ano.
<i>Net Zero Energy Emissions</i>	Produção de energia “limpa” em quantidade suficiente para compensar a energia adquirida a partir de combustíveis convencionais ao longo de um ano.

Quando se aplicam medidas de eficiência energética em termos construtivos combinadas com a produção local de energia a partir de fontes de energias renováveis, e o consumo energético do edifício é igual ou próximo da energia produzida, o resultado obtido pode ser “*Net Zero Energy Buidings*” ou “*Near Zero Energy Buidings*”. Estes são edifícios que devem apresentar um balanço quase zero, ou seja, nos quais a procura e a oferta energéticas sejam quase equivalentes [15]. De forma clara, alguns autores referem o conceito NZEB, como edifícios que no final de um ano típico são neutros. Para alcançar este conceito é fundamental que as necessidades de energia térmica e eléctrica sejam reduzidas e que a quantidade de energia injectada na rede seja igual à consumida [16]. Este tipo de edifícios não tem que ser obrigatoriamente autónomo e isolado visto que poderá continuar ligado a uma rede energética, quer se trate de energia eléctrica, sistemas de distribuição de calor e frio, rede de gás, biomassa ou biocombustíveis [17]. Quando a energia produzida pelos sistemas de energias renováveis não é suficiente o edifício utiliza energia proveniente da rede e em caso de se verificar uma produção de energia eléctrica superior às necessidades esta é injectada na rede [14]. O desempenho destes edifícios é avaliado essencialmente através de dois pressupostos fundamentais, a redução das necessidades energéticas do edifício e a produção de energia eléctrica ou outros tipos de energia a partir de fontes de energia renováveis, de forma a alcançar o balanço energético desejado [16].

Relativamente à climatização, aquecimento e arrefecimento, este sector corresponde a uma fracção importante da energia final total consumida, pelo que é fundamental o desenvolvimento rápido de tecnologias alternativas às tradicionais, que melhor satisfaçam as necessidades energéticas neste campo. A quantidade de energia para aquecimento, na sua maioria de origem não eléctrica, encontra-se devidamente contabilizada, e é possível dizer que 75 % da energia consumida nos edifícios é utilizada para aquecimento do ambiente e água quente doméstica [18]. Quanto ao arrefecimento, como este pode ser obtido através de equipamentos eléctricos (*chillers*, sistemas de ventilação ou outros), a energia eléctrica dispensada para esses equipamentos encontra-se incluída no consumo total de electricidade nos edifícios, sendo complexa a sua monitorização individual. Desta forma, o consumo eléctrico nos edifícios é analisado como um indicador das necessidades de arrefecimento, de onde se pode explorar o consumo efectivo, na medida em que o aumento do consumo eléctrico pode indicar também um aumento das necessidades de arrefecimento.

O subsolo terrestre possui uma inércia térmica muito elevada que lhe confere uma temperatura constante ao longo do ano (aproximadamente 15 °C), ficando longe da temperatura

ambiente no Verão e Inverno. Na estação de aquecimento a temperatura do solo é superior à do ar ambiente e na de arrefecimento inferior, ou seja, encontra-se em contra ciclo. Logo, depreende-se que uma boa alternativa para climatizar o interior de um edifício seria usar o solo como um recurso energético renovável, utilizando para tal um sistema de ventilação por tubos enterrados. O processo passaria por fazer o ar do exterior circular pelo subsolo através dos tubos enterrados no solo que teriam uma extremidade ligada ao edifício e outra extremidade ligada ao exterior. De forma a facilitar a compreensão da conotação utilizada, é importante referir que esta técnica é conhecida no sector como “*GroundCooling*” ou “*BuriedPipes*” [19].

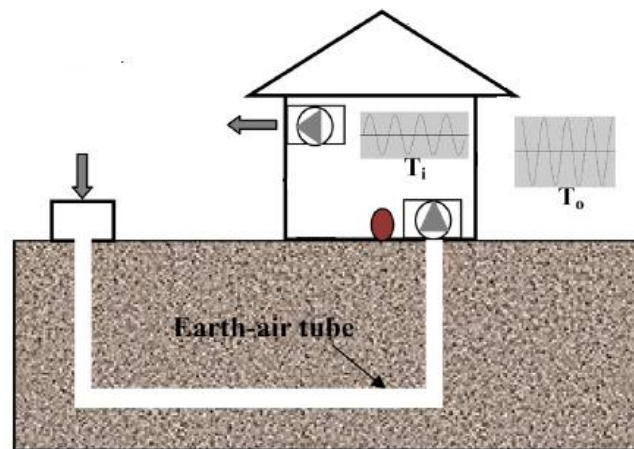


Figura 5: Princípio de Funcionamento de um Sistema Aberto de Tubos Enterrados

O tubo enterrado é caracterizado por ser um tubo longo e subterrâneo de metal ou polímero através do qual circula ar. Durante o processo de arrefecimento, o ar passa através do tubo, cede parte do seu calor ao solo e entra no ambiente como ar mais frio. Da mesma forma, durante o processo de aquecimento, o ar passa através do tubo e recebe uma parcela de calor do solo, entrando no ambiente como ar mais quente [20]. Como referido anteriormente, isto acontece devido à elevada inércia térmica do solo, ou seja, quanto maior for a profundidade do solo, mais amortecidas serão as flutuações de temperatura na sua superfície, exposta ao clima exterior. Além disso, existe também um atraso temporal entre as flutuações à superfície e as que se verificam em camadas mais profundas, logo a uma profundidade suficiente a temperatura do solo é consideravelmente mais baixa que a do ar exterior no Verão e superior no Inverno. Esta opção é uma medida que remonta aos anos 70, onde foi alvo de algum interesse por parte de arquitectos e engenheiros civis como sendo uma solução alternativa aos sistemas de ar

condicionado convencional, no entanto, só nos últimos 10 anos é que esta técnica mereceu atenção devido à forte pressão económica que se vive e à necessidade de que todos os edifícios caminhem para os consumos quase nulos de energia.

1.2 Objectivo Geral

O objectivo desta dissertação consiste na validação do modelo *EarthTube* do *EnergyPlus*, disponibilizado através do Programa *DesignBuilder* usando como referência resultados de estudos experimentais realizados por outros autores e reportados na literatura científica, de forma a perceber quais as potencialidades e limitações do modelo em causa.

Mais concretamente, o processo de validação consiste na reprodução, através do *DesignBuilder*, de um modelo que tenha por base outro modelo experimental encontrado na literatura. Através das funcionalidades do *EarthTube* serão obtidos resultados que permitirão fazer uma análise comparativa com os resultados experimentais, de forma a perceber se será viável ou não a validação do modelo.

Posteriormente à validação pretende-se avaliar a aplicabilidade deste sistema de ventilação passiva em clima português e analisar os resultados de consumo energético de forma a perceber a potencialidade da sua implementação.

1.3 Estado da Arte

A utilização do solo como recurso energético para a climatização passiva tem sido alvo de estudo ao longo das últimas décadas. Artigos de imprensa internacional, para o público em geral, têm difundido bastante os sistemas acoplados ao solo como meios de arrefecimento passivo de baixo custo energético. O Departamento de Energia dos Estados Unidos da América iniciou estudos no sentido de quantificar o fluxo de calor trocado entre habitações e o solo, com o objectivo de validar algoritmos que se pudessem dispor ao domínio público em programas de análise térmica como *DOE-2* e *BLAST*. Posteriormente, estudos de *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* e da Universidade de Minnesota deram continuação às actividades do Departamento de Energia, analisando uma variedade de sistemas térmicos ligados ao solo [21]. Durante os anos seguintes, e até os nossos dias, inúmeros estudos relacionados com o aproveitamento e caracterização térmica do solo têm sido efectuados por diferentes investigadores ao redor do mundo. Como é de se esperar de qualquer processo de amadurecimento de uma tecnologia, as áreas de investigação expandiram-se e diversificaram-se

para diversos cursos de engenharia, nomeadamente a mecânica. Com o decorrer dos anos, a utilização dos sistemas de climatização com recurso ao solo, tem obtido cada vez mais, maior aceitação quer nos Estados Unidos quer na Europa. A aplicação destes sistemas ultrapassa as 550.000 unidades em todo o mundo, com instalação de mais de 66.000 unidades anualmente sendo que, aproximadamente 80% dos casos se referem a utilizações domésticas [22]. É, tal como já foi referido, cada vez mais pertinente que se considere como uma alternativa as soluções passivas de ventilação, tal como os sistemas de ventilação por tubos enterrados. Esta solução tem ganho cada vez mais interesse e ao longo dos últimos anos tem sido alvo de investigação tanto na modelação científica e computacional como na componente experimental.

1.3.1 Modelação

Em 1954, Ingersoll realizou uma análise teórica dos permutadores de calor. Os seus resultados foram publicados no livro de sua autoria *“Heat Conduction, with Engineering, Geological and Other Applications”* [23]. Este serviu de base para muitos estudos subsequentes, como foi o caso de Akridge, que entre muitos outros, fizeram simplificações do modelo teórico para poder facilitar a realização de análises paramétricas, contudo sem abrir mão do rigor necessário para avaliar os sistemas de tubos enterrados. A esta tecnologia têm sido acrescentadas equações dos fenómenos da transferência de calor envolvidos no processo, que servem de suporte para os modelos actuais. Mostrel e Giovoni publicaram a equação do coeficiente de convecção à superfície do solo [24], Penmam definiu uma expressão para a transferência evaporativa de calor latente que relaciona a temperatura e humidade do ar com a temperatura do solo [25] e ainda outros têm aprimorado a série de *Fourier* que aproxima a evolução da temperatura da superfície do solo.

Os principais parâmetros a analisar inerentes a esta tecnologia, consistem na estimativa da temperatura do solo à profundidade de instalação dos tubos e na sua utilização como condição fronteira no balanço energético ao tubo para calcular a transferência de calor no tubo. Genericamente, a temperatura do solo é calculada em função da temperatura exterior introduzindo-se um factor de amortecimento da sua amplitude térmica que resulta em valores quase constantes a partir de uma certa profundidade (cerca de 4 m). O modelo para o cálculo da temperatura não perturbada do solo consiste numa função que depende da temperatura média anual da superfície do solo, tempo em horas após o início do ano, amplitude anual média da temperatura da superfície do solo, dia a que se verifica o valor mínimo anual da temperatura

média diária e da difusividade térmica do solo [26]. Também na norma europeia EN15241 é desenvolvido um modelo simplificado de tubos enterrados, no qual a distribuição da temperatura do solo ao longo do ano é modelada por uma curva sinusoidal baseada na temperatura média anual do ar exterior. No entanto, em relação à temperatura do ar, a temperatura do solo é corrigida em amplitude e deslocada (devido à inércia térmica do solo que retarda o reflexo das condições exteriores no solo) em função da profundidade. As correcções fazem-se pelo cálculo de termos para amplitude e atraso cujas funções são polinómios de 3º grau com a profundidade como variável [27]. Independentemente do grau de simplificação ou complexidade dos modelos, o grau de humidade do solo é sempre considerado por afectar significativamente as características térmicas do mesmo.

Com base na formação de um modelo analítico ou matemático, é possível através de técnicas inteligentes como as redes neuronais a previsão da temperatura do ar à saída do permutador ar-solo. Neste sentido tem sido desenvolvida investigação relativamente ao desenvolvimento de modelos matemáticos analíticos e numéricos. Santamouris apresenta uma revisão de alguns modelos analíticos e numéricos que são descritos à frente [28].

- Modelo Analítico

Os modelos analíticos baseiam-se em equações algébricas que estimam a temperatura à saída dos tubos. Alguns destes modelos são normalmente modelos transientes e propõem um conjunto de equações que descrevem os fenómenos de transferência de calor e massa. Alguns exemplos de estudos que têm sido realizados com este tipo de modelos são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2: Modelos Analíticos Propostos para o desempenho dos tubos enterrados

Tipo de Modelo	Dimensões	Nº de tubos	Validação
Analítico [29]	Unidimensional	1	Validação bem sucedida, contra dados experimentais
Transiente [30]	Tridimensional	1	Os dados de validação não foram fornecidos

- Modelo Numérico

Estes modelos surgem como alternativa aos modelos analíticos, dada a complexidade da resolução dos mesmos e pela necessidade de obter dados, próximos da realidade, que permitam compreender o comportamento real dos sistemas. O modelo numérico é mais completo e inovador pois trata pela primeira vez em conjuntos as trocas de calor latente e sensível entre o fluxo de ar e o tubo, bem como as perdas de carga e a difusão térmica no solo, tridimensionalmente, para além de permitir o controlo da direcção do fluxo, o que pode ser útil em caso de funcionamento em circuito fechado [31]. Os modelos apresentados na Tabela 3 são alguns dos modelos propostos para a simulação do desempenho dos tubos:

Tabela 3: Modelos Numéricos Propostos para o desempenho dos tubos enterrados

Tipo de Modelo	Dimensões	Nº de tubos	Validação
Numérico [32]	Unidimensional	1	Validação bem sucedida contra dados experimentais
Transiente [33]	Bidimensional	-	Os dados de validação não foram fornecidos

1.3.2 Casos de Estudo e dados experimentais

A instalação dos tubos enterrados é já uma tecnologia utilizada um pouco por todo o mundo existindo como caso de estudo diversas tipologias de edifícios (escritórios, residenciais, educacional, hospitalares, comerciais, etc) e estufas agrícolas. Nas Tabelas 4 e 5 é possível analisar alguns exemplos da implementação e monitorização da mesma:

Tabela 4: Estudos Experimentais com tubos enterrados, para o sector dos edifícios

País	Tipologia	Área	Características dos Tubos	Monitorização
Alemanha [34]	Escritórios	1000 m ²	2 tubos, comprimento de 90 m, profundidade de	A temperatura ambiente no Verão baixou de 30°C para os 20°C,

			2,3 m, caudal de ar de 1100 m ³ /h	correspondendo a uma poupança de energia de 12,1 kWh/m ² /ano
França [32]	Residencial	39 m ²	1 tubo, comprimento de 39 m, profundidade de 2 m	Durante o Verão a temperatura no interior consegue manter-se a 27 °C
Noruega [35, 36]	Educacional	1010 m ²	1 conduta, comprimento de 1,5 m x 2m, profundidade de 1,5 m, Betão	O sistema consegue suprir todas as necessidades de arrefecimento do edifício
Suíça [37]	Comercial	8050 m ²	43 tubos em paralelo, comprimento de 23 m, profundidade 6 m	O sistema consegue suprir 1/3 das necessidades de arrefecimento.

Tabela 5: Estudos Experimentais com tubos enterrados em estufas

País	Área	Características	Monitorização
Grécia [38]	1000 m ²	5 tubos, comprimento de 30 m, profundidade de 1,5 m	A diminuição de temperatura conseguida no Verão é de 10 °C

Canadá [39]	80 m ²	26 tubos, divididos em duas filas com 13 tubos cada, comprimento de 10,5 m, profundidade de 450 mm e 750 mm, respectivamente	A temperatura do ar a circular dentro dos tubos é de 3-4 °C
Turquia [40]	48 m ²	1 tubo, comprimento de 47 m, profundidade de 3 m	O COP diário de arrefecimento foi de 15,8. Em média, o COP total foi de 10,0

Os casos de estudo a cima mencionados são apenas alguns exemplos da panóplia de edifícios e estufas em que esta tecnologia já foi testada. Como se pode verificar através do resultado das monitorizações, o balanço é positivo, no entanto esta tecnologia revela-se mais vantajosa para os climas mais quentes, em que a redução de consumo de energia para arrefecimento é mais significativa e por isso mesmo a maioria dos estudos incidirem nesta estação.

Quanto à implementação de sistemas de tubos enterrados em território nacional, já alguns progressos foram feitos e alguns casos práticos foram desenvolvidos. O Edifício Solar XXI, construído em 2006 em Lisboa, é considerado um edifício altamente eficiente de acordo com os regulamentos portugueses e combina várias medidas passivas com tecnologias de energias renováveis. Uma das soluções passivas implementadas consiste na insuflação de ar por tubos enterrados para pré-arrefecimento do ar, sendo este o único mecanismo de arrefecimento do edifício. O sistema de tubos enterrados é constituído por 32 tubos de 30 cm de diâmetro e 15 m de comprimento, instalados a 4,5 m de profundidade onde a temperatura do solo varia entre 13°C-19°C, conferindo um bom potencial de arrefecimento do ar exterior no Verão. O ar circula por convecção natural ou ventilação forçada (cada tubo tem um ventilador de 30 W associado). Nos dias de Verão o ar é insuflado nos gabinetes entre 22-23°C, resultando num decréscimo da temperatura interior de cerca de 2-3°C. A ventilação natural por infiltração pela fachada e a cobertura desempenham um papel fundamental nas condições de conforto no interior,

principalmente quando promovida durante a noite no Verão, para remoção de carga térmica acumulada durante o dia [17].

Em 2004 desenvolveu-se o projecto *CoolHouse* que tinha como objectivo desenvolver casos de aplicação de sistemas de ventilação passiva em edifícios residenciais de forma a proporcionar condições de ambiente interior agradáveis nos meses de Verão, sem a necessidade de recorrer ao sistema de climatização convencional. Em Portugal este projecto intitulou-se “Alma Verde” e foi desenvolvido no sudoeste do país, em Vila de Bispo. O projecto englobava 3 casas, que funcionavam como habitação, em que se instalaram os tubos enterrados para funcionarem durante parte do dia (meio da tarde até ao início da manhã). Posteriormente foram monitorizados para avaliar o seu desempenho e impacte nas condições térmicas do interior do edifício. Apesar dos registos terem sido feitos ao longo de, apenas, 6 meses e isso ser um factor importante para a consideração da viabilidade da tecnologia, o estudo demonstrou que o sistema é excelente a remover os máximos e mínimos da temperatura exterior diária, conseguindo resultados de -11°C , em arrefecimento, e de $+8^{\circ}\text{C}$, em aquecimento em relação à temperatura exterior. A potência de arrefecimento média tinha sido estimada em 2,5 kW e no entanto a atingida foi de 4,8 kW. O relatório revelava que a razão de se ter optado por não funcionar com o sistema em contínuo foi permitir a recuperação térmica do solo e, embora se diga que esta pode não ser necessária, a literatura menciona um decréscimo do rendimento do sistema quando se recorre ao sistema em vários dias quentes seguidos, devido ao sobreaquecimento do solo [41].

1.3.3 Configuração

Todos os estudos, experimentais ou matemáticos, têm desenvolvido várias configurações para os sistemas de ventilação por tubos enterrados. Assim, esta tecnologia pode ser dividida em dois tipos de sistemas: Sistemas Fechados e Sistemas Abertos [42].

- **Sistemas Fechados**

O sistema funciona em circuito fechado com um fluido de serviço intermédio que se encarrega de fazer o transporte de energia para arrefecer (ou aquecer) o ambiente desejado. O seu funcionamento é semelhante ao de uma bomba de calor cuja fonte fria (ou quente, caso seja arrefecimento ou aquecimento) é o solo. Como é típico de uma tecnologia “verde” ainda não existe uma configuração *standard* para a qual tendam a maioria das soluções e, deste modo, os sistemas desenvolvidos recentemente apresentam as seguintes configurações: Verticais,

Horizontais, em Série, em Paralelo, em Andares e Irregular (parte destas configurações pode ser observada na Figura 6).

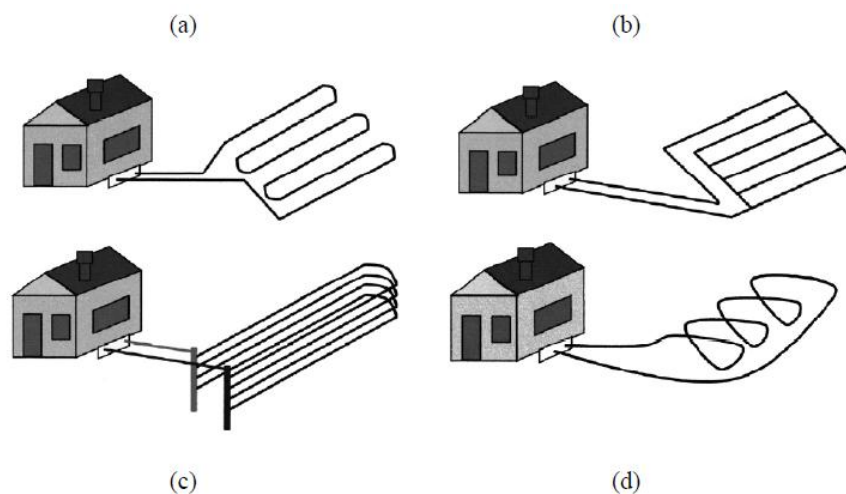


Figura 6: Configurações de tubos enterrados (a) Série, b) Paralelo, c) Andares, d) Irregular) [43]

Existem também modelos mais adaptados a situações específicas. No que respeita à profundidade existem modelos mais adequados para grandes profundidades (50-150 m) e para baixas profundidades [44]. As formas das secções tubulares também variam de caso para caso existindo as apresentadas na Figura 3.

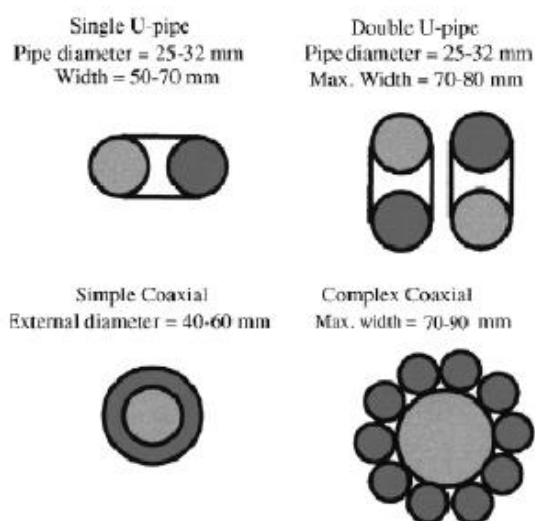


Figura 7: Configurações tubulares para tubos enterrados [45]

- Sistema Aberto

Nestes sistemas o fluido de trabalho circula no permutador sem fazer nenhum circuito fechado independente e é injectado directamente no espaço a climatizar. Assim, o único fluido passível de ser utilizado é o ar que é tomado directamente do exterior ou recirculado do próprio ambiente interior. Este sistema é constituído por um tubo, uma serpentina ou um feixe de tubos paralelos dispostos horizontalmente nas fundações ou em espaços adjacentes à edificação.

Importa referir que todos estes sistemas podem funcionar como sistema de climatização principal e independente ou como apoio de um sistema convencional de caldeira e *chiller*, dependendo do potencial do permutador face às condições de projecto [43].

Esta dissertação incidirá sobre o estudo de sistemas de tubos enterrados em circuito aberto.

1.3 Contributo da Dissertação

No âmbito desta dissertação e tendo em conta o objectivo geral acima referido são antecipados os seguintes contributos específicos:

- Identificação de trabalhos experimentais relativos a testes e ensaios realizados a unidades piloto de ventilação recorrendo a permutadores ar-solo;
- Simulação computacional de pilotos experimentais identificados tendo por objectivo a verificação e eventualmente a validação do modelo proposto pelo *Energyplus* avaliando especificamente o impacto da tecnologia em análise do desempenho energético do edifício, e se possível nos indicadores de conforto do mesmo;
- Validação do modelo testado;
- Quanto ao estudo relativo a algumas cidades em Portugal, pretende-se cruzar vários parâmetros de forma a perceber a viabilidade desta tecnologia em território nacional, e caso se considere pertinente a sua aplicabilidade, determinação das melhores zonas.

1.4 Estrutura da Dissertação

O trabalho desenvolvido nesta dissertação organiza-se em 5 Capítulos:

Capítulo 1: Neste primeiro capítulo apresenta-se um enquadramento geral sobre a problemática energética actual fazendo assim a ponte para a temática dos Edifícios *nZEB* e sistemas de ventilação passiva, tais como os tubos enterrados. São descritos os objectivos para este trabalho e contribuições do mesmo. É também feita uma revisão do estado da arte sobre as investigações adjacentes aos tubos enterrados.

Capítulo 2: Descrição dos programas de simulação *EnergyPlus* e *DesignBuilder*, incidindo no modelo *EarthTube*, na qual é descrita toda a sua metodologia operacional.

Capítulo 3: Procede-se ao processo de validação. É feita uma análise de sensibilidade e posteriormente caracterizado um modelo experimental base, encontrado na literatura. É feito ainda um estudo de *benchmarking* comparando os resultados obtidos com os resultados obtidos por outros estudos simulados. Estes modelos são reproduzidos e simulados no *DesignBuilder* utilizando o modelo *EarthTube*, de forma a comparar os resultados e validar o modelo.

Capítulo 4: Uma vez validado o modelo *EarthTube*, este é utilizado para fazer uma análise do desempenho do sistema em Portugal, são cruzados vários parâmetros adjacentes à tipologia dos tubos com as zonas Norte, Centro e Sul e posteriormente analisados os resultados.

Capítulo 5: Por fim neste último capítulo são apresentadas as considerações finais do trabalho e referidos os possíveis alvos para trabalhos futuros na continuação deste tema.

1.5 Conclusão

Ao longo deste capítulo foi dada uma visão geral do panorama energético actual, e algumas formas de colmatar ou utilizar os recursos energéticos de forma mais racional. Neste sentido sendo o sector dos edifícios um dos grandes consumidores de energia foi abordado o conceito dos *nZEB*, e remetido para os sistemas de tubos enterrados, caso de estudo desta tese. Foi também descrito o objectivo geral e projecto previsto para a mesma.

Capítulo 2

O algoritmo Earthtube no DB/Energy+

2. Modelação

Resumo do Capítulo

Este capítulo incide principalmente sobre os programas computacionais utilizados ao longo deste trabalho. É feita uma caracterização do *software EnergyPlus* e uma descrição do modelo de cálculo utilizado pelo mesmo. De seguida procede-se à análise descritiva das funcionalidades do *software DesignBuilder* e finalmente é descrito o Modelo *EarthTube* do *EnergyPlus*, seguido de uma descrição de todo o modelo de cálculo utilizado pelo mesmo.

Como foi analisado no capítulo anterior, o sector dos edifícios é um forte consumidor energético, muito devido aos seus sistemas adjacentes, no caso os sistemas de ventilação, aquecimento e arrefecimento (AVAC), iluminação e abastecimento de água quente. Neste sentido, ao projectar-se um edifício de raiz, este deve englobar medidas que o tornem mais económico de forma a alcançar o máximo de eficiência energética.

Para a simulação térmica de um edifício ser feita correctamente é preciso ter em consideração os aspectos inerentes à transferência de calor, tais como, a condução térmica, os fluxos convectivos, a radiação e os fluxos de massa pela envolvente. É possível, através de sistemas de simulação computacional, fazer uma análise energética de um edifício e melhorá-lo para que se torne mais eficiente, estes sistemas permitem modelar com precisão, a interligação de elevada complexidade inerente aos fenómenos mencionados.

Existe uma grande variedade de *softwares* de simulação energética de edifícios, como por exemplo, Google *SketchUp* (versão 7.1), *Open Studio* (versão 1.7), *EnergyPlus* (versão 8.0). No caso do Google *SketchUp*, versão 7.1, este cria modelos 3D e é utilizado junto com o *OpenStudio*, *plugin* que foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia do Departamento de Energia dos EUA, com a intenção de possibilitar o uso do modelo directamente na simulação energética com o *EnergyPlus*.

Precisamente, este trabalho será desenvolvido, tendo por base dois sistemas computacionais, o *EnergyPlus* e o *DesignBuilder*. Um edifício irá ser simulado e analisado inicialmente sem soluções de ventilação passiva e posteriormente com a integração de opções de ventilação passiva, como é o caso do modelo *EarthTube*.

2.1 Caracterização do software *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* é um programa de simulação computacional, concebido pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)* a partir dos programas, já existentes, *BLAST* (patrocinado pelo Departamento da Defesa Americano) e *DOE-2* (patrocinado pelo Departamento de Energia Americano), que divergem essencialmente no método de cálculo das cargas térmicas, isto é, o primeiro utiliza a abordagem dos factores ponderados, enquanto o segundo utiliza a abordagem do balanço de energia. Esta foi uma iniciativa do Departamento de Energia dos Estados Unidos, para estimular o desenvolvimento de um código computacional que fosse capaz de calcular não só a carga térmica da edificação, mas também que pudesse prever o consumo de energia do sistema de climatização [41]. O seu menu de abertura é representado na Figura 8:

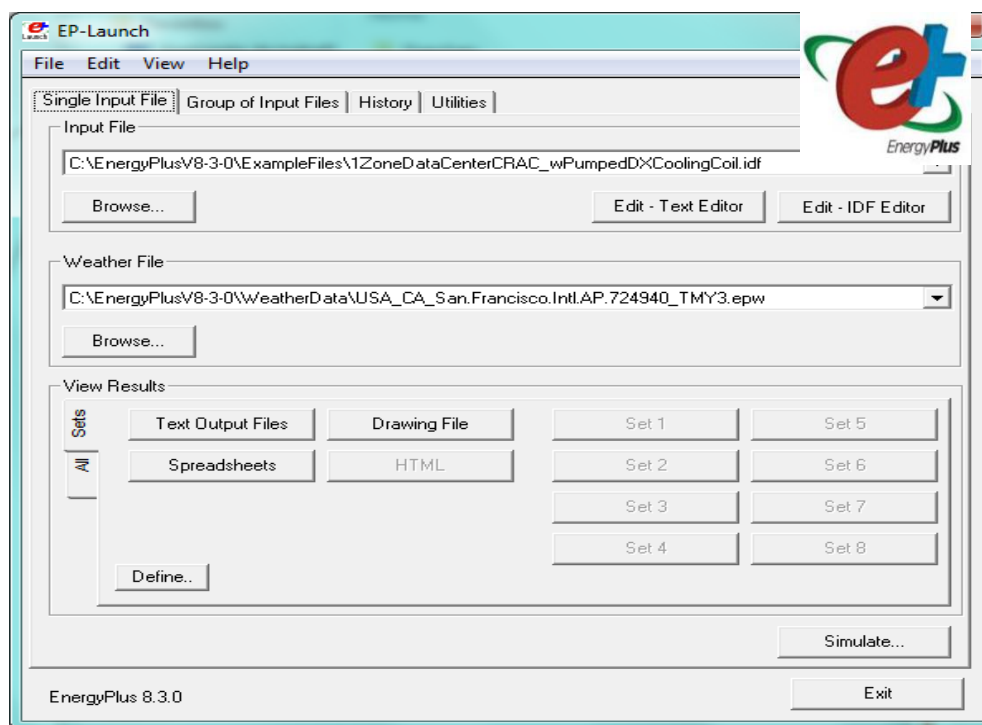


Figura 8:Interface de abertura do software *EnergyPlus*

Está escrito em linguagem *Fortran 90* e foi desenvolvido para modelar edifícios e todos os seus sistemas adjacentes, tais como, aquecimento, arrefecimento, iluminação, ventilação e outros fluxos de energia. A partir dos dados de descrição da construção, de um arquivo climático e de outros parâmetros fornecidos pelo usuário, este *software* calcula as cargas térmicas de arrefecimento e aquecimento necessárias para o controle térmico do ambiente, bem como as temperaturas superficiais das paredes da edificação em estudo. Utiliza um ficheiro climático com

dados horários de temperatura, humidade relativa, ventos e radiação solar, e outro arquivo relativo às características dos materiais com extensão *idf*. Possui capacidades de simulação diferenciada, que abrangem desde *timesteps* de cálculo menores que uma hora, sistemas modulares e equipamentos energéticos com simulações em cada zona baseadas no balanço térmico, fluxos de ar multi-zona, conforto térmico, consumos de água, ventilação natural até aos sistemas fotovoltaicos. É ainda caracterizado por ser um *software* em código-aberto de estrutura modular que, deste modo, permite a adição de módulos para modelar novas situações. Os ficheiros relativos aos parâmetros para simulação e resultados, são criados no formato *.csv* e podem ser lidos como texto ou em formato *Excel* [42].

Relativamente às cargas térmicas, estas são calculadas pelo módulo de simulação do balanço térmico com um *timestep* definido pelo utilizador, e essa informação é conduzida ao módulo de sistemas, onde se encontram modelados os sistemas de climatização do edifício, onde é determinada a resposta dos sistemas do edifício, aquecimento e arrefecimento, e dá *feedback* ao módulo de simulação de balanço térmico, que incorpora esta resposta no *timestep* seguinte. Pode utilizar *interfaces* exteriores, como é o caso do *DesignBuilder*, o que podemos analisar na Figura 9. Todo este processo é controlado pela componente de gestão de simulação [43].

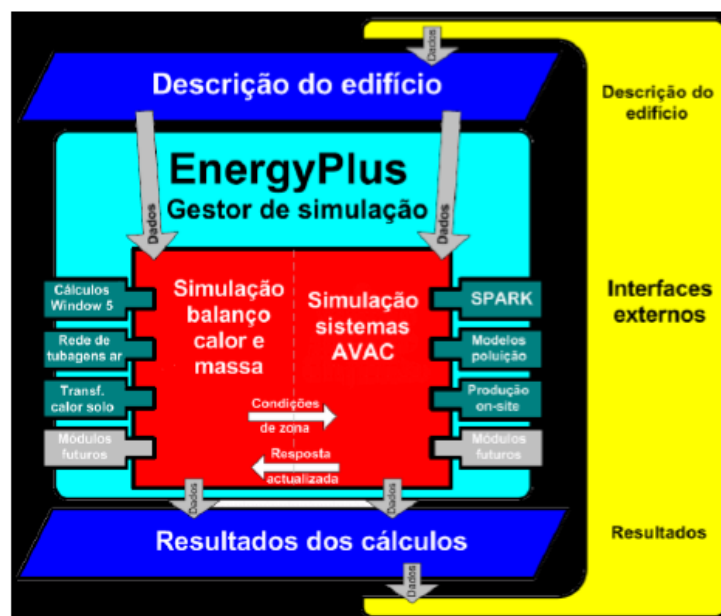


Figura 9: Estrutura de funcionamento do *EnergyPlus* [43]

2.1.1 Modelo de Cálculo do *EnergyPlus*

Para realizar os cálculos o *EnergyPlus* utiliza uma equação (1) de balanço de energia dentro da zona, que inclui a variação da energia armazenada pelo ar da zona e o calor específico do mesmo [45].

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p (T_{zi} - T_z) + m_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + Q_{sys} \quad (1)$$

Onde:

- $C_z = \rho a r C_p C t$
- $C t$ é o factor de ponderação da transferência de calor sensível;
- $C_z \frac{dT_z}{dt}$ é a energia armazenada no interior da zona;
- $\sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i$ é o somatório das cargas internas convectivas;
- $\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ é a transferência de calor por convecção originária das superfícies existentes na zona;
- $\sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p (T_{zi} - T_z)$ é a transferência de calor devido á mistura de ar de diferentes zonas;
- $m_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ é a transferência de calor devido à infiltração do ar exterior;
- Q_{sys} é a taxa de troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização.

Se desprezarmos o calor específico do ar, a equação (2) de regime permanente resultante será:

$$-Q_{sys} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p (T_{zi} - T_z) + m_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) \quad (2)$$

A energia trocada com o sistema de climatização é dada pela diferença entre a entalpia do ar insuflado e o ar extraído de acordo com a equação (3):

$$Q_{sys} = m_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (3)$$

A equação assume que o caudal de ar insuflado é igual ao caudal de ar removido pelo sistema de extracção. A combinação da equação 1 com a 3 resulta na equação (4):

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p (T_{zi} - T_z) + m_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + m_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (4)$$

O somatório das cargas térmicas das zonas e a energia trocada com o sistema de climatização são iguais à variação de energia no ar da zona. Para determinar o termo diferencial relativo à temperatura da zona, substituindo o termo transiente, pode ser usada uma aproximação por diferenças finitas, de acordo com a seguinte equação (5):

$$\frac{dT}{dt} = (\partial t)^{-1} (T_z^t - T_z^{t-\partial t}) + O(\partial t) \quad (5)$$

A utilização de integração numérica numa simulação pode causar algumas preocupações visto que pode existir erros de aproximação ao longo dos diversos incrementos de tempo, contudo a natureza cíclica da simulação energética de um edifício deverá fazer com que estes erros se anulem ao longo de cada ciclo diário, fazendo com que no final da simulação não haja acumulação de erros. Para eliminar este problema foram desenvolvidas equações de ordem superior, com o objectivo de permitir ao utilizador definir intervalos de tempo maiores do que anteriormente. Conclui-se que a aproximação de diferenças finitas de terceira ordem de acordo com a equação era a que apresentava os melhores resultados.

$$\frac{dT_z}{dt} = \partial t^{-1} \left(\frac{11}{6} T_z^t - 3 T_z^{t-\partial t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\partial t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\partial t} \right) + O(\partial t^3) \quad (6)$$

Com a utilização de diferenças finitas de terceira ordem a Equação (1), transforma-se:

$$C_z \partial t^{-1} \left(\frac{11}{6} T_z^t - 3 T_z^{t-\partial t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\partial t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\partial t} \right) = \sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p (T_{zi} - T_z) + m_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + m_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (7)$$

Ao fazer uma manipulação das várias equações anteriormente descritas é possível determinar a equação da zona, utilizando a seguinte equação (8):

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i^t + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p T_{zi} + m_{inf} c_p T_{\infty} + m_{sys} C_p T_{supply} - \left(\frac{Cz}{\partial t}\right) \left(-3T_z^{t-\partial t} + \frac{3}{2}T_z^{t-2\partial t} - \frac{1}{3}T_z^{t-3\partial t}\right)}{\frac{11Cz}{6\partial t} + \left(\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p + m_{inf} c_p + m_{sys} C_p\right)} \quad (8)$$

Esta é a forma de cálculo utilizada pelo *EnergyPlus*, sendo a carga térmica da zona o comando de todo o processo, isto é, a carga térmica é utilizada como ponto de partida para activar o sistema. Posteriormente à simulação do sistema obtém-se o valor real da capacidade do mesmo e se necessário a temperatura é ajustada. A ordem seguida pelo procedimento pode ser resumida [44]:

- Utilizando as equações é efectuada uma estimativa da energia requerida ao sistema de ar de modo a equilibrar a equação de acordo com a temperatura do ar definida pelo termóstato;
- Considerando a estimativa como procura, o sistema de ar é simulado para determinar a capacidade de fornecimento efectivo no instante analisado;
- A capacidade real do sistema é usada na Equação (8) para calcular a temperatura resultante da zona.

2.2 Caracterização do software *DesignBuilder*

O *EnergyPlus* não fornece um *interface* gráfico ao utilizador, logo para colmatar esta questão, foi mais tarde criado o programa *DesignBuilder* que permite ao utilizador criar um modelo gráfico 3D do edifício num ambiente informático atractivo e utilizar bases de dados meteorológicas construídas para mais de 2000 localizações mundiais.

O *DesignBuilder* é o primeiro *interface* exaustivo para o programa de simulação térmica *EnergyPlus*. Este programa possui uma plataforma de modelação de edifícios em 3D de fácil manipulação. Não há limitações de geometrias tri-dimensionais e estão disponíveis elementos realísticos que fornecem de forma imediata detalhes, como por exemplo, a espessura das paredes [45]. Este é um *software* bastante intuitivo, na janela principal podemos encontrar a barra de ferramentas, separadores de dados, tela de edição, separadores de telas e painel de navegação de informação, como é possível verificar na Figura 10. No entanto recorre a todos os modelos e métodos de cálculo implementados no *EnergyPlus*, e portanto é impossível desassocia-lo do

mesmo. Por seu lado, o *EnergyPlus* funciona por si próprio e o modelo do edifício que utiliza pode ser descrito directamente em código ou importado do *DesignBuilder*.

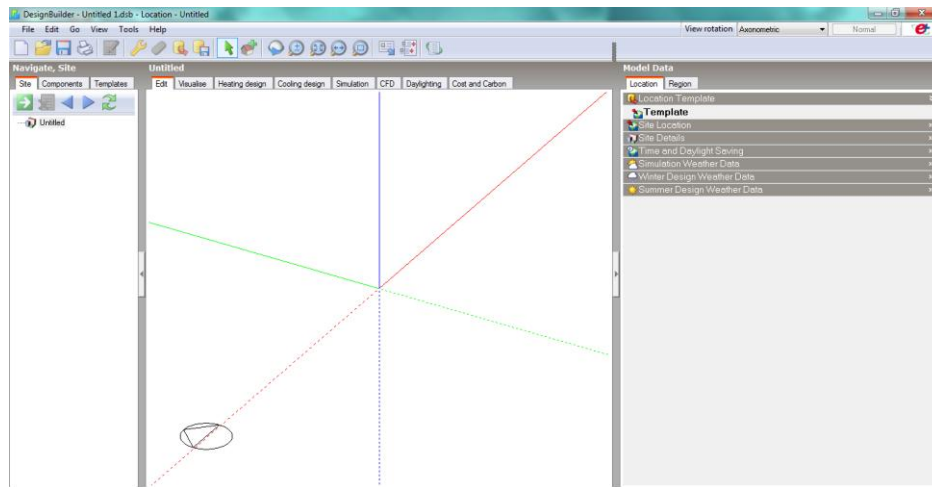


Figura 10: Interface de entrada do *DesignBuilder*

O utilizador pode criar as suas próprias predefinições de acordo com as características de cada edifício. Todas estas ferramentas aliadas à estrutura hierarquizada visível na Figura 11, permitem que se defina e altere rapidamente as características do edifício desde o nível mais geral, edifício, ao mais detalhado, partes constituintes das zonas.



Figura 11: Hierarquia de dados do *DesignBuilder*

O *DesignBuilder* é então suficiente para descrever todas as soluções normalmente implementadas, e portanto, a simulação do edifício pode ser conduzida unicamente neste ambiente. O tipo de informação resultante da análise neste *software* resume-se ao tipo de variáveis normalmente consideradas relevantes para o projecto preliminar dos edifícios, entre elas, os consumos energéticos associados ao aquecimento e arrefecimento em todas as estações do ano. Outra das potencialidades deste programa é a possibilidade de se utilizar bases de dados de materiais nele integradas, para a descrição da envolvente.

Em suma, pode-se dizer que através do *DesignBuilder* é possível obter:

- Dados do comportamento físico e ambiental do edifício, tal como imagens/vídeos em qualquer estágio do desenvolvimento do modelo;
- Possibilidade de obter dados concretos de funcionamento do edifício no processo de concepção do mesmo;
- Facilidade de uso permite efectuar uma simulação detalhada dos projectos e é ideal para uso como plataforma educativa.

2.3 Caracterização do Modelo *EarthTube* do *EnergyPlus*

O modelo *Earthtube* é uma ferramenta operacional do *EnergyPlus*. Através do *DesignBuilder* é possível acoplar esta solução passiva a um edifício e analisar o impacto da sua instalação no mesmo. Integrado na funcionalidade de sistemas de AVAC, requer os seguintes inputs (Figura 12):

- Tubos: Raio (m), Espessura (m), Comprimento (m), Distância entre a Superfície Exterior do Tubo e o Solo Imperturbado (m), Condutividade Térmica (W/m K), Velocidade do Ar no Interior do Tubo (m/s), Profundidade do Centro Radial do Tubo Abaixo do Solo (m).
- Solo: Densidade (kg/m^3), Calor Específico (J/k °C), Condutividade Térmica (W/m °C), Coeficiente de Absorção, Fracção da Taxa de Evaporação.

Model Data	
Activity Construction Openings Lighting HVAC Generation Outputs CFD	
Earth Tube	
<input checked="" type="checkbox"/> Include earthtube	
Outside air definition method	2-Min fresh air (Per person)
Operation	
Schedule	Projecto earth-tubes
Control	
Minimum zone temperature when cooling (°C)	15
Maximum zone temperature when heating (°C)	50
Delta temperature (deltaC)	4
Fan Electric Consumption Configuration	
Earth tube type	3-Exhaust
Fan pressure rise (Pa)	96.8
Fan total efficiency	0.8
Pipe Specifications	
Pipe radius (m)	0.17
Pipe thickness (m)	0.01
Pipe length (m)	55.00
Pipe thermal conductivity (W/m-K)	0.16
Pipe depth under ground surface (m)	3.00
Soil Heat Transfer Calculations	
Soil condition	2-Heavy and damp
Average soil surface temperature (°C)	15.63
Amplitude of soil surface temperature (°C)	6.99
Phase constant of soil surface temperature	360.00
Term Flow Coefficients	
Constant	1.0000000000
Temperature	24.1500000000
Velocity	7.7000000000
Velocity squared	15.4000000000

Figura 12: Interface de entrada do Modelo *EarthTube* através dos software *DesignBuilder*

A equação básica utilizada para calcular a taxa de fluxo de ar do *EarthTube* é:

$$EarthTubeFlowRate = (E_{design})(F_{schedule})[A + B|T_{zone} - T_{odb}| + C(WindSpeed) + D(WindSpeed^2)]$$

Onde, em termos de dados climáticos, o primeiro termo, E_{design} , representa a vazão de ar dentro do tubo em $[m^3/s]$ e $F_{schedule}$ é o nome da agenda de tarefas que modifica a vazão no tubo. A é a constante térmica do solo, adimensional, B é a diferença de temperatura entre as temperaturas de bulbo seco do ar interior e exterior, dado em $[C^{o-1}]$. $|T_{zone} - T_{odb}|$ é a diferença de temperatura (oC) entre as temperaturas do ar de bulbo seco interior e exterior, abaixo do qual o *EarthTube* é desligado. Isto é, por exemplo, se o utilizador especifica um delta de 2^oC , o *EarthTube* ficará disponível se a diferença de temperatura entre a temperatura interior e exterior, for de pelo menos 2^oC . Garantindo que se a diferença de temperatura entre o exterior e interior for muito pequena, não haverá ventilação, pois subentende-se que para uma boa troca térmica é necessária uma significativa diferença de temperatura. C é a velocidade do vento no exterior do edifício $[m/s]$. $WindSpeed$ é a velocidade do ar no tubo, $[m/s]$. D é o quadrado da velocidade do vento no exterior do edifício $[s^2/m^2]$ [46].

Quanto aos dados da temperatura média da superfície do solo, a amplitude de temperatura da superfície do solo e a constante de fase de temperatura da superfície do solo, que é o tempo decorrido desde o início do ano até que a temperatura da superfície do solo alcance a temperatura mínima do ano, estes são calculados separadamente através de um programa autónomo separado, *CalcSoilSurfTemp*, disponível no *EnergyPlus* e representado a seguir na Figura 13:

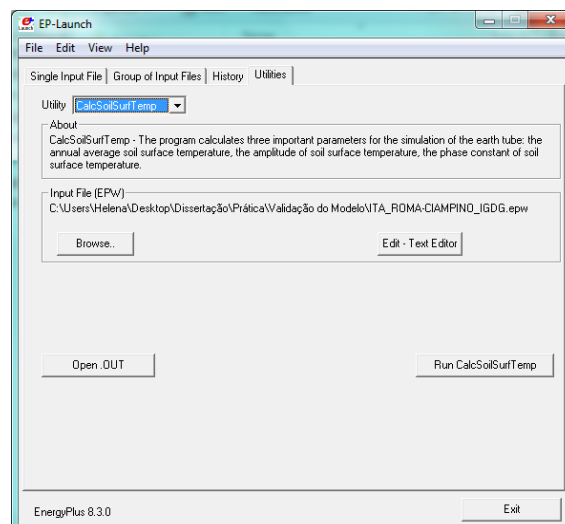


Figura 13: Interface do programa *CalcSoilSurfTemp* do *EnergyPlus*

Este programa é simples e requer apenas dois campos de entrada: um arquivo com a condição do solo e outro com as condições da superfície do solo, em função das condições climáticas. Calcula a difusividade térmica e condutividade térmica do solo em torno do tubo e o coeficiente de absorção e a taxa de evaporação na superfície do solo, e baseia os seus cálculos nas informações fornecidas no campo *SoilCondition* – condições do solo. Isso determina a difusividade e condutividade térmica do solo envolvente, relacionados com a quantidade de calor transferido do solo para o ar que passa ao longo do *EarthTube* [46].

2.3.1 Modelo de Cálculo do Modelo EarthTube

Os pressupostos assumidos pelo programa são os seguintes [47]:

- A convecção do fluxo no interior do tubo é hidrodinâmica e termicamente desenvolvida;
- A temperatura do solo em redor do tubo torna-se uniforme após uma determinada distância do centro do tubo (espessura do anel), de modo a que a temperatura da superfície do tubo seja uniforme após “r” distância do centro do tubo, onde “r” é o raio do tubo;
- O perfil de temperatura na vizinhança do tubo não é afectado pela presença dos mesmos, de modo a que a temperatura da superfície do tubo é uniforme no sentido axial;
- Condutividade térmica em redor do tubo é homogénea;
- Tubos com área de secção transversal constante na direcção axial;
- A velocidade do vento (m/s) (u) é um valor médio anual dado pelos dados meteorológicos do *EnergyPlus*, que faz uma média dos dados individuais durante todo o ano;
- O coeficiente de transferência de calor por convecção, h_s , na superfície do solo ($\text{W/m}^2\text{°C}$), é função da velocidade do vento (u). De acordo com McAdams [49], pode ser aproximada pela seguinte relação:

$$h_s = 5,7 + 3,8u$$

No caso do h_e e h_r , estes podem ser determinados pelas seguintes equações:

$$h_e = h_s(1 + 0,0168af)$$

$$h_r = h_s(1 + 0,0168ar_a f)$$

em que $a=103 \text{ Pa/°C}$.

A temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), T_{ma} , também é calculada através dos dados meteorológicos do *EnergyPlus* pela média de valores individuais determinados para a temperatura para todo o ano. O valor apropriado da emitância hemisférica da superfície do solo, ϵ , é de 0,93~0,96. A constante de radiação (W/m^2), ΔR , depende das propriedades radiactivas do solo, humidade relativa do ar e temperatura efectiva do céu. Um valor adequado será $63 \text{ W}/\text{m}^2$. O coeficiente de absorção, β , depende da absorvância e condições de sombreamento do solo. Este é aproximadamente igual=1 (albedo da superfície do solo). O albedo depende da cobertura do solo e teor de humidade. Para albedo=0,1 correspondem solos húmidos, para albedo=0,2 correspondem solos moderados, e para albedo =0,3 correspondem a solos secos.

A radiação média solar (W/m^2), S_m , é determinada a partir dos dados meteorológicos contidos no *EnergyPlus*, através do cálculo da média dos valores de radiação solar individuais globais horizontais de todo o ano. A fracção da taxa de evaporação, f , também depende principalmente da cobertura do solo e do nível de humidade do solo. Com base em resultados relatados por Penman [50], recomenda-se a estimativa da fracção f do seguinte modo. Para o solo “nú”, f é directamente proporcional ao teor de humidade do solo, isto é, $f=1$ corresponde a solo saturados, $f=0,6-0,8$ corresponde a solos molhados, $f=0,4-0,5$ solos húmidos e $f=0,1-0,2$ corresponde a um solo árido. Para solos secos $f=0$, visto que não ocorre evaporação. Para solos cobertos a fracção f é obtida multiplicando o valor de 0,7 por f , para o solo “nú”, dependendo do teor de humidade do solo.

A humidade relativa do ar, r_a , também é calculada a partir de dados meteorológicos do *EnergyPlus* pela média dos valores individuais medidos ao longo do ano. A difusidade térmica do solo (m^2/S), αS , e a condutividade ($\text{W}/\text{m } ^{\circ}\text{C}$), k_s , variam com a densidade e teor de humidade. Estes valores são representados sob diferentes condições na Tabela 6, segundo a *ASHRAE - Handbook of HVAC Applications, 1991*.

Tabela 6: Condutividade e difusidade térmica do solo para diferentes condições

Condições do Solo	K_s (Condutividade) ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)	αS (Difusividade Térmica do Solo) x 10^{-7} (m^2/s)
Solo pesado, saturado	2,42	9,04
Solo pesado, húmido	1,30	6,45
Solo pesado, seco	0,865	5,16

Solo leve, húmido	-	-
Solo leve, seco	0,346	2,80

A frequência angular anual, w , apresenta um valor de 1.992×10^{-7} rad/s e o amortecimento em profundidade (m), D , é calculado a partir da equação:

$$D = \sqrt{\frac{2\alpha_s}{w}}$$

O valor de δ é calculado da seguinte forma:

$$\delta = \frac{1 + i}{D}$$

A amplitude da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), T_{va} , pode ser avaliada a partir de dados meteorológicos do *EnergyPlus*, dividindo a diferença entre o valor máximo e mínimo da temperatura do ar (valor de todo o ano), por dois. Do mesmo modo, a amplitude da radiação solar (W/m^2), S_v , pode ser determinada a partir de dados meteorológicos, dividindo-se a diferença entre o máximo e o mínimo da radiação solar (valor de todo o ano), por dois. O ângulo de fase entre a insolação e a temperatura do ar (rad), ϕ_l , é calculado subtraindo o ângulo de fase de insolação pelo ângulo de fase de temperatura do ar. O ângulo de fase de insolação e a temperatura do ar reflectem o ponto desde o início do ano em que a temperatura do ar e a insolação atingem um valor mínimo no ano inteiro. A constante de fase do ar (seg), t_{0a} , é o tempo decorrido desde o início do ano que a temperatura do ar leva a atingir o valor mínimo do ano. Usando todos os parâmetros de entrada e variáveis descritas acima, a temperatura média da superfície do solo ($^{\circ}\text{C}$), T_m , a amplitude da variação da temperatura da superfície do solo ($^{\circ}\text{C}$), A_s , a constante de fase da superfície do solo (seg), t_0 , e diferença do ângulo de fase entre o ar e a temperatura da superfície do solo (rad), ϕ_s , podem ser determinadas da seguinte forma:

$$T_m = \frac{1}{h_e} [h_r T_{ma} - \varepsilon \Delta R + \beta S_m - 0,0168 h_s f b (1 - r_a)]$$

$$A_s = \left| \frac{h_r T_{va} - \beta S_v e^{i\phi_l}}{(h_e + \delta k_s)} \right|$$

$$t_0 = t_{0a} + \frac{\phi_s}{w}$$

$$\phi_s = -Arg\left[\frac{h_r T_{va} - \beta S_v e^{i\phi_l}}{(h_e + \delta k_s)}\right]$$

T_m , A_s e t_0 são calculadas através do programa *CalcSoilSurfTemp* e são entradas para o *EnergyPlus*. Os símbolos $||$ e Arg representam o módulo e o argumento de um número complexo, respectivamente. A fim de calcular A_s e ϕ_s , o número complexo em consideração pode ser rearranjado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{h_r T_{va} - \beta S_v e^{i\phi_l}}{(h_e + \delta k_s)} = & \frac{\left(h_e + \frac{k_s}{D}\right)(h_r T_{va} - \beta S_v \cos \phi_l) + \frac{k_s}{D}(-\beta S_v \sin \phi_l)}{\left(h_e + \frac{k_s}{D}\right)^2 + \left(\frac{k_s}{D}\right)^2} + \\ & i \frac{\left(h_e + \frac{k_s}{D}\right)(-\beta S_v \sin \phi_l) - \frac{k_s}{D}(h_r T_{va} - \beta S_v \cos \phi_l)}{\left(h_e + \frac{k_s}{D}\right)^2 + \left(\frac{k_s}{D}\right)^2} \end{aligned}$$

Assumindo um solo homogéneo de difusidade térmica constante, a temperatura em qualquer profundidade, z , e tempo, t , pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$T_{z,t} = T_m - A_s \exp\left[-z\left(\frac{\pi}{365\alpha_s}\right)^{1/2}\right] \cos\left\{\frac{2\pi}{365}\left[t - t_0 - \frac{z}{2}\left(\frac{365}{\pi\alpha_s}\right)^{1/2}\right]\right\}$$

Nesta expressão, a unidade de tempo, t , e a constante de fase da superfície do solo, t_0 , podem ser convertidas em dias. Da mesma forma, a unidade de difusidade térmica do solo, α_s , pode ser convertida em m^2/dia . Ao integrar a expressão relativa á profundidade, o perfil de temperatura média do solo vertical, que varia entre a profundidade z_1 e z_2 ($^{\circ}C$), pode ser determinada da seguinte forma: ²⁾

$$T_{z_1,z_2,t} = T_m + \frac{A_s}{(z_2 - z_1)\gamma\sqrt{2}} \left\{ e^{-\gamma z_1} \cos\left[\frac{2\pi}{365}(t - t_0 - z_1 L - 45.6)\right] - e^{-\gamma z_2} \cos\left[\frac{2\pi}{365}(t - t_0 - z_2 L - 45.6)\right] \right\}$$

Onde,

$$\gamma = (\pi / 365 \alpha_s)^{1/2}$$

$$L = \frac{1}{2} (365 / \pi \alpha_s)^{1/2}$$

Por último, no que diz respeito à transferência de calor entre o solo e um sistema de tubos de terra, a condutividade térmica do ar ($W/m\ ^\circ C$), k_{ar} , e a viscosidade cinética do ar (m^2/s), ν , deve ser calculada em primeiro lugar.

$$k_{air} = 0.02442 + (10^{-4}(0.6992T_a))$$

$$\nu = 10^{-4}(0.1335 + 0.000925T_a)$$

Utilizando os valores da condutividade térmica do ar, k_{ar} , e viscosidade cinética do ar, ν , o coeficiente de transferência de calor por convecção para a superfície interior do tubo ($W/m^2\ ^\circ C$), h_c , pode ser avaliado. Este é função do número de Reynolds, Re , e do número de Nusselt, Nu , onde:

$$h_c = \frac{Nu k_{air}}{2r_i}$$

$$Nu = \frac{(f_a/2)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f_a/2)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)}$$

$$f_a = (1.58 \ln Re - 3.28)^{-2}$$

$$Re = \frac{2r_i V_a}{\nu}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha_{air}}$$

R_1 é o raio do tubo interior (m) e V_o é a velocidade média do ar para as condutas (m/s). Após a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção, R_c , R_p e R_s são respectivamente calculados da seguinte forma:

$$R_c = \frac{1}{2\pi r_i h_c}$$

$$R_p = \frac{1}{2\pi k_p} \ln \frac{r_1 + r_2}{r_1}$$

$$R_s = \frac{1}{2\pi k_s} \ln \frac{r_1 + r_2 + r_3}{r_1 + r_2}$$

Em que R_c é a resistência térmica devido à transferência de calor por convecção entre o ar no tubo e o tubo de superfície interior (m C/W), R_p é a resistência térmica, devido à transferência de calor por condução entre a superfície interior e exterior do tubo (m C/W), e R_s é a resistência térmica devido à transferência de calor por condução entre a superfície externa da tubulação e do

solo imperturbado (m C/W). Para além disto o R_2 é espessura do tubo (m), R_3 é a distância entre a superfície externa do tubo e o solo imperturbável (m) e L é o comprimento do tubo (m). Por fim, a transferência de calor entre o solo e o ar dentro do tubo é igual á quantidade de perdas de calor como fluxos de ar ao longo do tubo.

$$U_t [T_a(y) - T_{z,t}] dy = -\dot{m}_a C_a [dT_a(y)]$$

com,

$$U_t = \frac{1}{R_t}$$

$$R_t = R_c + R_p + R_s$$

U_t é o coeficiente de transferência de calor global do sistema de tubos enterrados (W/cm), $T_a(y)$ é a temperatura do ar no tubo à distância y do tubo de entrada ($^{\circ}\text{C}$), e \dot{m}_a é o fluxo de massa de ar ambiente que circula através do tubo (kg/s). C_a é o calor específico do ar (J/kg $^{\circ}\text{C}$) e R_t é a resistência térmica total entre o ar no tubo e o solo (m C/W).

Considera-se que a temperatura do ar na entrada é igual à temperatura do ar ambiente, e temperatura do ar à saída é calculada resolvendo a equação de transferência de calor acima.

2.4 Conclusão

Ao longo do capítulo foi descrito o modelo de *software* que irá ser estudado nesta dissertação, *DesignBuilder* e *EnergyPlus*. Foi ainda analisado em pormenor o modelo matemático em estudo nesta dissertação, o “*EarthTube*”.

Capítulo 3

Análise e validação do Modelo Earthtube

3. Processo de Validação

Resumo do Capítulo

Neste capítulo irá proceder-se á validação do Modelo “*EarthTube*” através do *software DesignBuilder*. Para tal, primeiramente será realizada uma análise de sensibilidade ao modelo verificando alguns parâmetros inerentes ao mesmo através de uma célula de teste. Em seguida serão analisados pormenorizadamente quatro casos de estudos, dois deles onde pretendem validar o modelo através da análise da temperatura interior do espaço e os outros dois através da análise da temperatura de saída dos tubos.

3.1 Estratégia de Validação

Nas últimas décadas a oferta de diversos sistemas de simulação computacional relativos ao desempenho térmico e energético dos edifícios tem sido bastante vasta. Por excelência, a forma de legitimar os modelos computacionais é a confrontação dos resultados com valores experimentais. Os modelos experimentais medem a realidade do fenómeno, ou problema, em estudo face a todas as condicionantes que a implementação prática impõe, estes valores quando correctamente obtidos são a referência do modelo computacional desenvolvido, quanto mais próximos estiverem os resultados deste da referência melhor, pois simula a realidade com menor erro.

Quando não há possibilidade de criar um modelo experimental a validação das simulações deve proceder-se com recurso aos resultados experimentais existentes na bibliografia. Outra forma é utilizar modelos comprovados cujos dados sirvam de base para efectuar a validação.

Nesta dissertação o *software* utilizado para tais finalidades, como já foi explicitado anteriormente, é o *DesignBuilder* que serve de *interface* ao *software EnergyPlus* e pretende-se proceder à validação da ferramenta “*EarthTubes*” presente no mesmo de forma a que seja possível garantir a veracidade dos dados obtidos. Numa primeira fase a estratégia para o processo de validação passou por procurar estudos experimentais onde houve-se uma oferta de dados reais e assim sendo por comparação com os dados obtidos na simulação fosse possível retirar resultados ao nível quantitativo que nos possibilitassem perceber qual o nível de fiabilidade do programa. No entanto tal estratégia não foi possível devido à falta de dados experimentais disponíveis e portanto foi necessário traçar outro tipo de análise que possibilitasse na mesma chegar à conclusão se seria fiável ou não a utilização do programa, para tal recorreu-se a uma

análise qualitativa, ou seja, ao invés da validação ser feita por comparação de resultados simulados e experimentais, foi definida uma célula teste com uma série de parâmetros relativos ao modelo e um indicador de desempenho e através de uma análise de sensibilidade foi medida a resposta do modelo às alterações dos dados de entrada de forma a perceber a sua correlação. Finalmente após analisar a amostra pretende-se traçar um padrão desta resposta do modelo e perceber a sua variação. Sendo assim após esta primeira análise já possível traçar um padrão e obter algumas ideias de resposta ao problema para a validação do modelo, posteriormente de forma a reforçar esta análise de sensibilidade é feito um segundo plano de validação por comparação com outros dados experimentais através de uma análise de *benchmarking* onde é possível através da comparação entre os resultados de desempenho de ambos os sistemas, perceber a fiabilidade do modelo apresentado.

Em suma, é através destas diferentes estratégias que se pretende contornar o facto de não ser possível realizar a análise quantitativa pretendida através de diferentes metodologias qualitativas que nos permitem assim perceber a resposta deste modelo de simulação e fazer efectivamente a validação do mesmo.

3.2 Análise de Sensibilidade do Modelo

Através da análise paramétrica será analisado o grau de sensibilidade do modelo, o que será de grande relevância para compreender o sistema e o seu comportamento perante diferentes condições. A variável em análise será a temperatura do tubo, sendo os parâmetros com impacto no desempenho do sistema:

- ✓ Raio;
- ✓ Espessura;
- ✓ Comprimento;
- ✓ Material;
- ✓ Profundidade;
- ✓ Tipo de Solo.

As simulações foram efectuadas para um ano, no qual foi possível observar as variações da temperatura à saída dos tubos e é ainda importante salientar que a análise foi feita com o sistema em funcionamento contínuo.

Para a realização desta análise, foi então proposta uma célula modelo, com dimensões de 10 m x 10 m, como é possível observar na Figura 14:

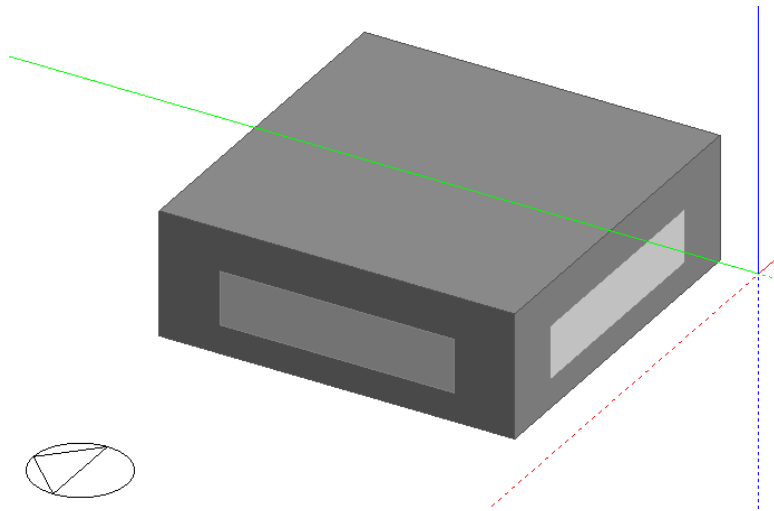


Figura 14: Célula de teste proposta para a análise de sensibilidade

Sabendo-se que as condições climáticas têm uma forte influência no desempenho dos tubos, dado que zonas de temperaturas muito elevadas podem levar a saturar o solo com alguma rapidez assim como climas com oscilações muito elevadas podem colocar os tubos a funcionar de forma muito instável, optou-se por escolher uma cidade em Portugal sendo esta a cidade de Bragança dado que tem uma grande amplitude térmica e é uma zona com um clima temperado mediterrâneo. Através do ficheiro climático “*wheather.data*” disponibilizado pelo *EnergyPlus* é possível verificar no “*DesignBuilderResultsViwer*” a variação da temperatura nesta cidade.

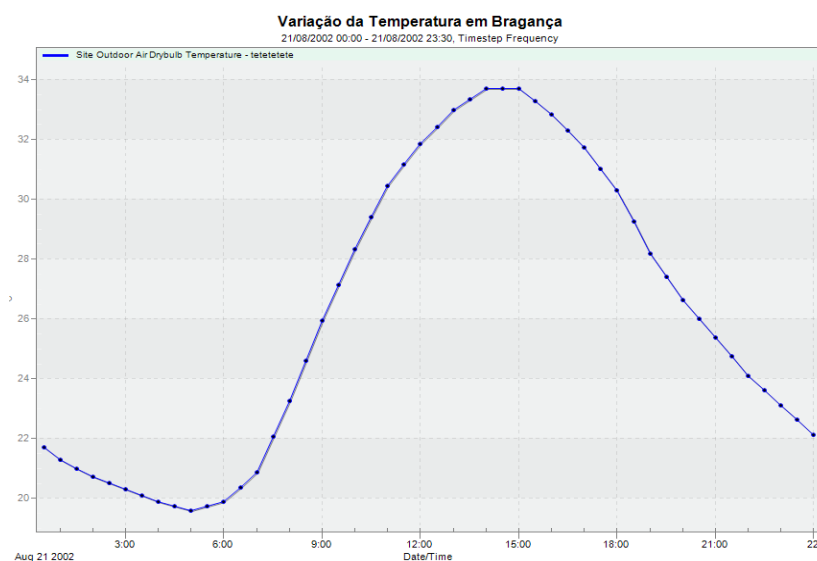


Figura 15: Variação da temperatura na cidade de Bragança para o dia 21 de Agosto de 2002

Relativamente ao método de ventilação, para garantir que o sistema esteja sempre em funcionamento é proposto a utilização da ventilação forçada (mecânica) e assim garante pelo menos duas trocas de ar por hora na célula de teste. Assim a análise é somente baseada na passagem de ar pelos tubos enterrados diminuindo as possíveis incertezas na comparação de outros parâmetros. Na Figura 16 é apresentado o painel proposto de simulação do módulo “earthtubes” do *DesignBuilder*. O estudo destes parâmetros vai ser realizado um a um, mantendo-se os demais fixos.

<input checked="" type="checkbox"/> Include earthtube	
Outside air definition method	1-By zone
Outside air (ac/h)	2,00
Operation	
Schedule	Copy of Office_OpenOff_Occ
Control	
Minimum zone temperature when cooling (°C)	0,00
Maximum zone temperature when heating (°C)	100,00
Delta temperature (deltaC)	1,00
Fan Electric Consumption Configuration	
Earth tube type	1-Natural
Pipe Specifications	
Pipe radius (m)	0,10
Pipe thickness (m)	0,05
Pipe length (m)	30,00
Pipe thermal conductivity (W/m-K)	52,00
Pipe depth under ground surface (m)	3,50
Soil Heat Transfer Calculations	
Soil condition	2-Heavy and damp
Average soil surface temperature (°C)	13,95
Amplitude of soil surface temperature (deltaC)	8,60
Phase constant of soil surface temperature	31,00
Term Flow Coefficients	
Constant	1,0000000000
Temperature	16,0000000000
Velocity	3,0000000000
Velocity squared	9,0000000000

Figura 16: Painel do módulo “Earthtube” para a simulação da célula modelo

✓ Tipo de Solo

Um dos parâmetros mais importantes relativos a um sistema de tubos enterrados e ao seu desempenho, é o tipo de solo. Através da análise deste é possível perceber se é adequado a construção de uma residência em determinado local. Através da Tabela 12, traduzida e adaptada do manual da ASHRAE [48], é possível dizer que é preferível um solo com condutividade térmica alta, como um solo rochoso, no entanto os pode ser complicado e tornar o investimento muito caro pelo facto de ser mais difícil enterrar os tubos neste tipo de local.

Tabela 7: Propriedades Térmicas do Solo

Solos/Rochas	Densidade seca, kg/m ³	Condutividade, W/(m K)	Difusividade, * 10 ⁻⁷ m ² /s
Terra pesada, 15% água, 5% água	1925	1,4 a 1,9	4,86 a 7,06
	1925	1,0 a 1,4	5,44 a 7,06
Terra leve, 15% água, 5% água	1285	0,7 a 1,0	6,36 a 5,44
	1285	0,5 a 0,9	6,48 a 6,48
Areia pesada, 15% água, 5% água	1925	1,0 a 2,1	5,44 a 10,71
	1925	0,9 a 1,9	6,36 a 11,38
Areia leve, 15% água, 5% água	1285	1,0 a 2,1	5,44 a 10,71
	1285	0,9 a 1,9	6,36 a 11, 38
Granito	2650	2,3 a 3,7	9,72 a 15,04
Calcário	2400 a 2800	2,4 a 3,8	9,72 a 15,04
Arenito	2570 a 2730	2,1 a 3,5	75,23 a 12,73

✓ Raio

A escolha do diâmetro a ser utilizado influência não só na capacidade de troca térmica do ar com o solo, mas também na capacidade do ventilador proporcionar a diferença de pressão necessária para o escoamento. Segundo estudos de Lee e Strand [49], o aumento do raio ocasiona um baixo coeficiente de convecção no interior do tubo, causando um aumento da temperatura de saída. Na Figura 17 não se verifica esta conclusão devido ao facto de ter sido utilizado sempre a mesma velocidade de entrada de ar no tubo o que faz com que a temperatura de saída vá diminuindo à medida que o raio aumento pois há uma diminuição da transferência de calor entre o ar e o solo devido à diminuição do coeficiente de convecção do ar. Em suma quanto maior for o raio, também maior deve ser a velocidade do fluxo de ar.

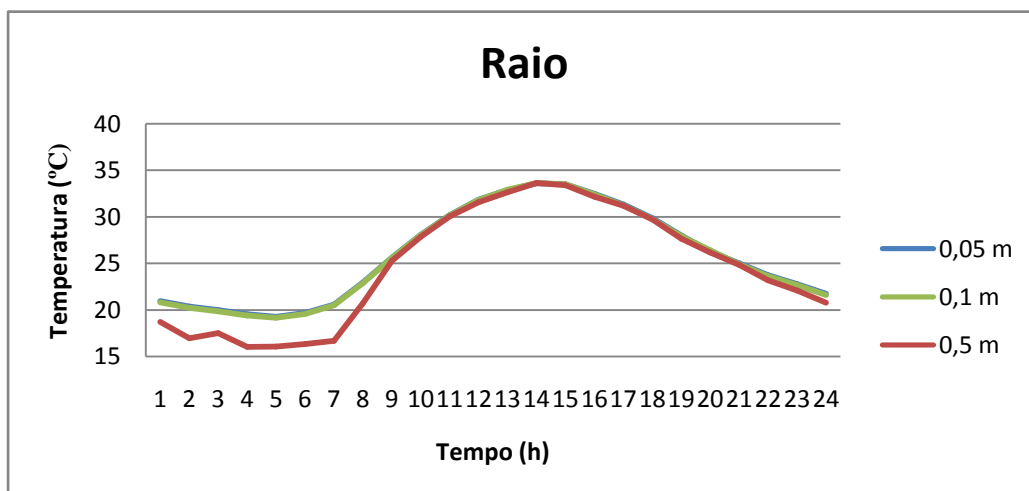


Figura 17: Variação do raio do tubo ao longo de um ano

✓ Espessura

A espessura da parede do tubo deve ter valor tal que não prejudique a transferência de calor do solo com o ar interior do tubo, mas que também tenha uma função de resistência mecânica. Fez-se uma variação entre três valores de espessura como é possível ver na Figura 18 e os resultados apresentados não revelam uma variação significativa, no entanto é possível verificar através de cálculos que existe um pequeno aumento na temperatura de saída para maiores espessuras. É importante referir que o tipo de material do tubo considerado foi o aço, e que os resultados vão de acordo aos encontrados pelo estudo de investigação de Horbach [50].

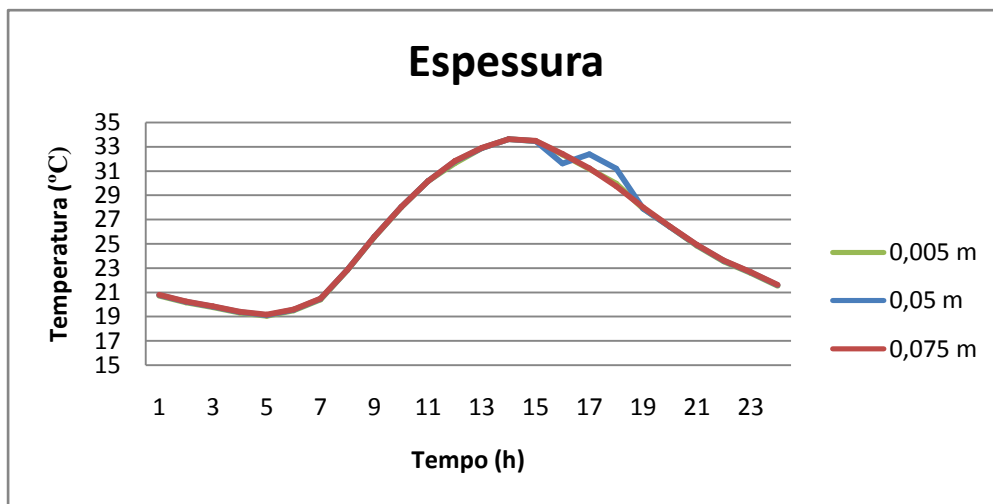


Figura 18: Variação da espessura do tubo para um dia típico de Verão

✓ Comprimento

O comprimento do tubo influencia na área de troca de calor entre a superfície do tubo e o ar exterior. Como é possível perceber através da Figura 19 a temperatura de saída do tubo aumenta à medida que aumenta o comprimento do mesmo verificando-se que vai variando cada vez menos, o que vai de acordo com estudos realizados.

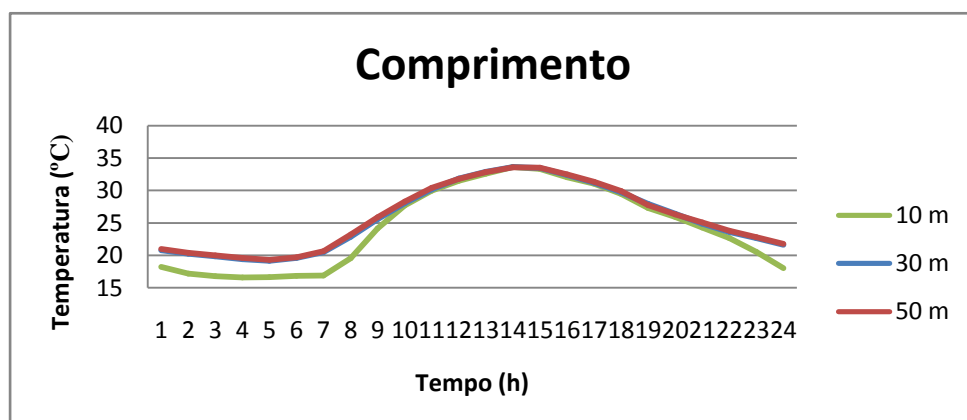


Figura 19: Variação do comprimento do tubo para um dia típico de Verão

✓ Material do Tubo

O material do tubo deve ser escolhido tendo em consideração não só a condutividade térmica mas também as suas propriedades mecânicas e o seu custo de forma a optar por um material com maior durabilidade e económico. Os materiais escolhidos foram o aço, alumínio e plástico, com 52 W/m °C, 204 W/m °C e 0,16 W/m °C, respectivamente e os resultados podem ser visualizados na Figura 20 seguinte:

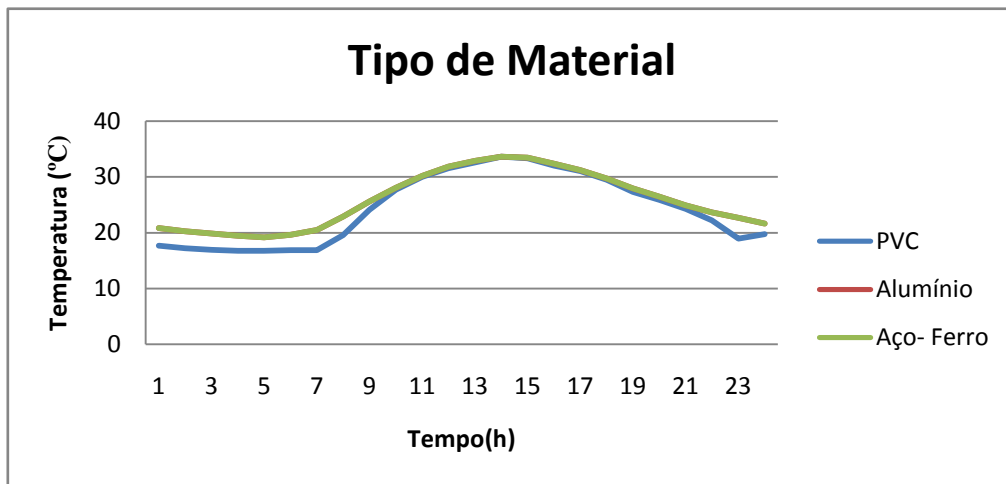


Figura 20: Variação dos tipos de materiais do tubo para um dia típico de Verão

✓ Profundidade

A temperatura do solo varia conforme a profundidade, facto que é possível verificar através da Figura 21. Pode-se verificar que á medida que a profundidade aumenta a temperatura de saída do tubo é maior, e aparentemente parece começar a estabilizar e não ter discrepâncias tão grandes o que também tem a ver com as características do solo.

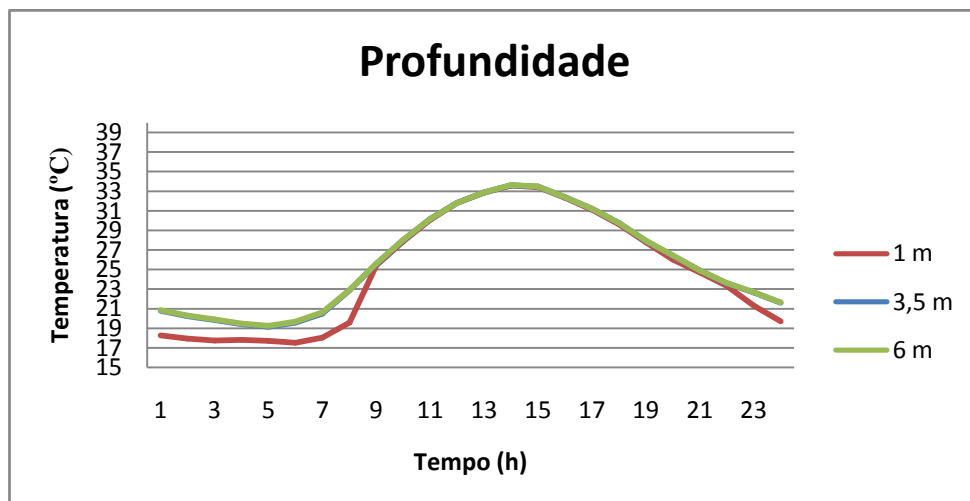


Figura 21: Variação da profundidade do tubo para um dia típico de Verão

3.3 Validação por comparação com dados experimentais

Para consolidar os resultados obtidos pela análise de sensibilidade para a validação do modelo dos *Earthtubes* são em seguida analisados quatro casos de estudo de forma a comprar os resultados experimentais ou simulados de outros programas com os resultados do modelo em estudo. Propositadamente, os casos de estudos analisados têm características bastante distintas de forma a conseguir abranger o máximo possível de informação e possibilitar uma visão geral do desempenho de um sistema de tubos enterrados.

3.3.1 Caso de Estudo: Perfil de aquecimento de um sistema de tubos enterrados em Arbil, Iraque

O modelo em estudo, visa a análise do desempenho de um sistema de tubos enterrados para aquecimento, instalado no Campus Universitário do pólo de Engenharia na Universidade de *Salahaddin* em Arbil, região do Iraque – Figura 22, entre o período de 1 de Novembro de 2012 a 28 de Fevereiro de 2013 [52].

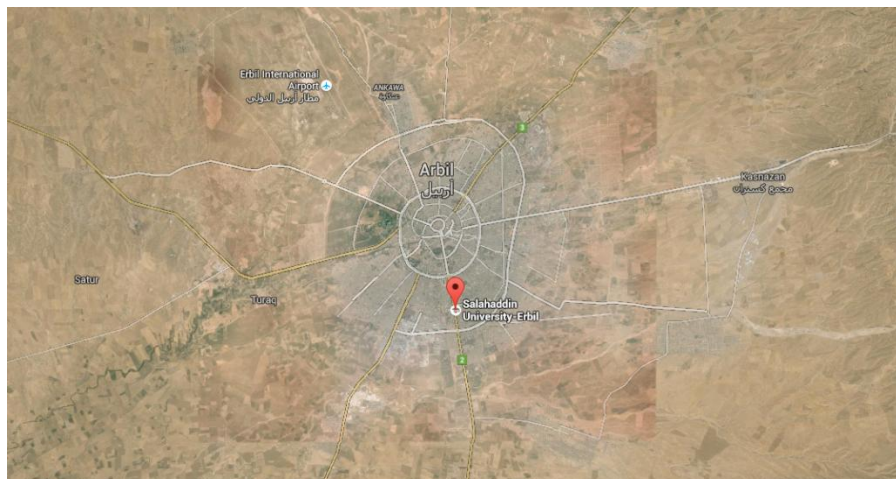


Figura 22: Representação geográfica do local do modelo de estudo, Universidade de Salahaddin, Arbil, Iraque.

O Iraque possui uma área $444\,442\text{ km}^2$, sendo o seu território quase todo continental, com apenas 50 km de costa no golfo Pérsico, e consta de 3 zonas paralelas: a planície da Mesopotâmia, banhada pelos rios Tigre e Eufrates, e com uma região desértica a SO e uma zona

montanhosa a NE [51]. O clima na área é considerado um deserto subtropical, sendo a temperatura média no Verão cerca de 38 °C durante o dia e 27 °C durante a noite. O ar quente no Verão é acompanhado por baixos níveis de humidade, variando de 5 a 15 %, e um baixo ponto de orvalho. Durante os meses mais frios de Inverno, as temperaturas diurnas são cerca de 16 °C, sendo à noite cerca de 10 °C podendo chegar por vezes a temperaturas negativas. Relativamente aos períodos de chuva 90% ocorrem entre Novembro e Abril.

Arbil é a capital do Curdistão Iraquiano, sendo a quarta maior cidade do Iraque. Possui um clima quente e temperatura, com uma temperatura média anual de 20,2 °C. Nos meses de Verão a temperatura ronda os 33,4 °C e nos meses de Inverno ronda os 7,4 °C. A pluviosidade é muito maior no Inverno do que no Verão, rondando uma média anual de 543 mm. Os meses de Junho a Setembro são muito secos, e a ocorrência de chuva é quase rara, sendo pelo contrário os meses de Dezembro a Março os que apresentam maior precipitação [52].

Relativamente à caracterização do modelo de teste, este faz parte do edifício principal do pólo de Engenharia e trata-se de um quarto de teste exterior, que a ele tem acoplado um sistema de tubos enterrados. O estudo contempla então as principais soluções construtivas para o modelo:

- ✓ Paredes Exterior (Blocos de Betão (0,25), Cimento (0,01))
- ✓ Paredes Interior (Blocos de Betão (0,25), GypsumPlastering)
- ✓ Pavimento (Betão)
- ✓ Telhado (Placas de Betão Armado (0,15))
- ✓ 1 Janela (Polyvinylchloride (0,02))
- ✓ 1 Porta (Polyvinylchloride (0,05))

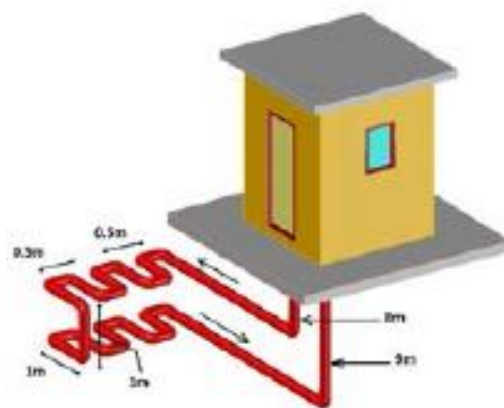


Figura 23: Modelo do Quarto de teste do estudo experimental

O quarto de teste possui um sistema de tubos enterrados, composto pela dobragem de um único tubo em 23 partes e dispostos em dois níveis. O primeiro nível é composto por 6 tubos ligados em serie na horizontal com 0,5 a 4 m de profundidade. O segundo nível foi colocado 1 m acima do primeiro e é também composto por 6 tubos e com 0,5 m de distância entre si. Cada nível foi formado com um pequeno ângulo de inclinação para evitar a condensação da água. Um ventilador com um motor de 70 W foi ligado à entrada do tubo no interior da sala através de uma conduta especialmente fabricada para aspirar o ar ambiente para o sistema. Por fim o ar deixa a sala através de um tubo colocado a 1 m do chão. É de salientar também que a velocidade do ar foi medida através um anemómetro *Model Testo 405-V1*. Em seguida são apresentadas as características construtivas do tubo:

- ✓ Nº tubos: 1 unidade
- ✓ Comprimento: 33 m
- ✓ Diâmetro: 0,1 m
- ✓ Espessura: 0,003 m
- ✓ Profundidade: 3,5 m
- ✓ Material do Tubo: Alumínio (204 W/m K)

O desempenho do sistema foi testado entre os meses de Novembro de 2012 até Fevereiro de 2013, onde foi ligado em dias específicos durante 6 horas por dia e efectuadas as medições às 03:00 da manhã e às 15:00 da tarde. Os dados medidos foram:

- Temperatura do solo a uma profundidade de 3,5 m
- Temperaturas interiores e exteriores
- Temperatura do ar na saída do tubo
- Temperatura média no interior

É ainda de referir que a temperatura do ar foi medida com um termómetro portátil *Testo 925*.

Através do *software DesignBuilder* foi possível reproduzir o modelo experimental. Ao nível da construção foi possível introduzir todas as soluções construtivas requeridas no modelo experimental. Na Figura 24 é possível ver o quarto de teste do modelo simulado:

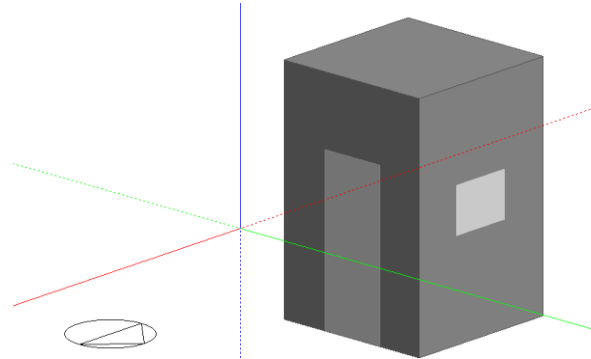


Figura 24: Quarto de teste no software de simulação DesignBuilder

Relativamente ao clima, o *EnergyPlus* não fornece ficheiros de leitura *.epw* para a região do Iraque, logo a alternativa proposta foi introduzir um ficheiro climático de uma região que possuísse um clima idêntico ao clima de Arbil. A região escolhida é Hama na região da Síria pois através da análise dos valores do clima e precipitação para a época de Inverno, disponível pelo banco de dados “*Climate-Data.org*”, foi possível perceber que ambos os climas são muito parecidos. Em seguida é representada a localização geográfica dos locais assim como uma tabela com a análise climática, Tabela 8.

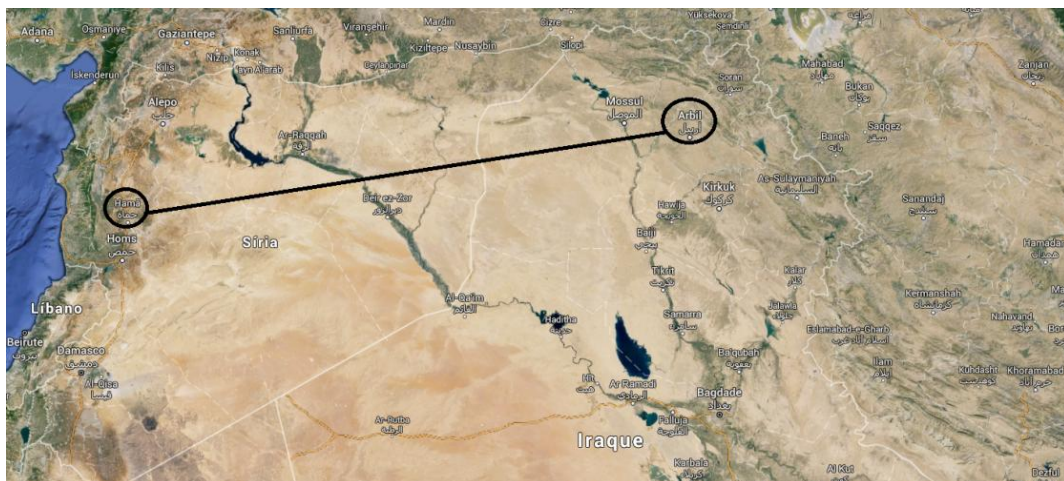


Figura 25: Localização geográfica de Hama e Arbil

Tabela 8: Comparação do Climas de Erbil (Iraque) e Hama (Síria)

Arbil				
Meses	Janeiro	Fevereiro	Novembro	Dezembro
Precipitação (mm)	112	98	56	80
°C	7,4	8,8	15,0	9,1
°C(min)	2,4	3,6	8,9	3,9
°C(máx)	12,4	14,1	21,2	14,4
Hama				
Precipitação (mm)	73	58	37	53
°C	7,5	9,0	14,0	9,0
°C(min)	3,2	4,0	7,5	4,6
°C(máx)	11,9	14,1	20,5	13,5

A temperatura média ao longo do ano em Erbil é de 20,2 °C e a precipitação média é de 543 mm, já Hama tem uma temperatura média de 18,2 °C e a precipitação é de 330 mm. Considerou-se portanto que estes valores seriam aceitáveis para proceder à simulação do modelo. Quanto às definições do “*Activity*” disponível no “*Model Data*”, é importante referir algumas opções que foram tomadas, tais como o *template* utilizado e *setpoints*. Tendo em consideração que este quarto de teste faz parte do complexo universitário, e que tem como fim precisamente testar o desempenho deste equipamento, o *template* definido foi o de um “*store room*”, visto que por ser uma zona com pouca actividade e pouco utilizada seria o mais adequado ao caso. Relativamente aos *setpoists* são definidos a seguir:

Tabela 9: *Setpoints* de *Setbacks* de aquecimento e arrefecimento definidos

Setpoint de Aquecimento	26
Setback de Aquecimento	24
Setpoint de Arrefecimento	28
Setback de Arrefecimento	30

Estes valores são relativamente altos devido ao clima da região e também por efeitos de cálculos, visto que o objectivo será fazer uma análise do desempenho dos tubos para aquecimento nos meses de Inverno, logo será importante definir *setpoints* de aquecimento mais altos para se poder analisar esse mesmo desempenho. Neste caso, é também importante referir, que apesar de se ter definido o *setpoint* e *setback* de arrefecimento, estes são irrelevantes nesta análise visto que o seu interesse só se verifica na época de Verão, para arrefecimento. Passando à análise do sistema de tubos enterrados, o modelo *EarthTube* disponível no separador de HVAC através do *software DesignBuilder*, requereu a introdução de um número de dados mais pormenorizado que os disponibilizados pelo modelo experimental. Em seguida é apresentada na Figura 26 os dados introduzidos no Modelo *EarthTube*, e posteriormente serão explicadas as opções relativas aos mesmos.

Outs de air definition method	6-Design flow rate
Design flow rate (m3/s)	0.02700000
Operation	
Schedule	tubos
Control	
Minimum zone temperature when cooling (°C)	0.00
Maximum zone temperature when heating (°C)	50.00
Delta temperature (deltaC)	4.00
Fan Electric Consumption Configuration	
Earth tube type	2-Intake
Fan pressure rise (Pa)	2203.0
Fan total efficiency	0.9
Pipe Specifications	
Pipe radius (m)	0.05
Pipe thickness (m)	0.00
Pipe length (m)	33.00
Pipe thermal conductivity (W/m-K)	52.00
Pipe depth under ground surface (m)	3.50
Soil Heat Transfer Calculations	
Soil condition	1-Heavy and saturated
Average soil surface temperature (°C)	14.94
Amplitude of soil surface temperature (deltaC)	7.00
Phase constant of soil surface temperature	344.00
Term Flow Coefficients	
Constant	1.000000000
Temperature	8.380000000
Velocity	2.390000000
Velocity squared	5.710000000

Figura 26: Dados requeridos pelo modelo *EarthTube* no *software EnergyPlus*

A Figura 26 reflecte os dados introduzidos no modelo *EarthTube*, mas tendo em conta que o modelo experimental não fornece informação suficiente para necessário fazer algumas considerações para ser possível prosseguir com a simulação. No que respeita ao controlo do

sistema optou-se por considerar para a temperatura mínima de controlo 0 °C e para a temperatura máxima 50 °C, isto porque logicamente o que se deseja é que o sistema esteja a funcionar no caso do aquecimento para as máximas temperaturas e no caso do arrefecimento para as mínimas temperaturas, logo seria pertinente considerar estes valores extremos visto que assim o sistema estará sempre a funcionar. Seguidamente no que respeita aos dados do ventilador, considerou-se que um valor razoável para a eficiência do mesmo fosse 90% e como é dado pelo caso de estudo a potência a que o mesmo funciona, foi então possível calcular a pressão relativa ao mesmo. Relativamente às características do tubo, tal como foi explicado anteriormente, o estudo experimental apenas referir o tipo de material como sendo um metal, mas não referia qual e assim sendo após alguns cruzamentos de outros casos de estudo, foi possível verificar que a opção mais utilizada será o “Aço” que foi então a escolha utilizada. Quanto às condições do solo, foi necessário recorrer à ferramenta *CalcSoilSurfTemp* apenas disponível no software *EnergyPlus*, para determinar as três variáveis necessárias a introduzir. Para tal a ferramenta apenas nos requer a introdução de dois parâmetros: o tipo de solo em redor do tubo, que posteriormente resultará nos dados da difusividade térmica (T_m) e condutividade térmica (A_s) do solo circundante, e o tipo de solo à superfície que resultará na determinação do coeficiente de absorção e taxa de evaporação da fracção da superfície do solo (t_0). O modelo experimental refere que a condição do solo em torno do tubo é argiloso, logo considerou-se que o parâmetro a introduzir para a condição do solo junto ao tubo seria “pesado e húmido”. No caso da condição do solo à superfície, tendo por base o clima da região Iraquiana, considerou-se que este seria um solo “nú e árido”. Finalmente no que respeita às características do ar, os valores introduzidos no modelo foram determinados através da análise do ficheiro climático introduzido para “Hama” e assim sendo foi possível determinar a temperatura média do ar ambiente, assim como a sua velocidade. Como já foi referido anteriormente, devido à inexistência de um ficheiro climático relativo ao clima do caso de estudo “Arbil-Iraque”, o clima considerado foi o que se aproximou mais do mesmo, isto é, “Hama-Síria”. Como tal, para a maior consistência dos resultados simulados, foi feita uma análise dos dados relativos às condições ambientais do local: temperatura do ar ambiente, velocidade do vento, e temperatura do solo. Quanto aos dois primeiros parâmetros, foram analisados através do ficheiro de leitura “*Design Buidar Results Viewer*”. Em média, para os meses de Novembro de 2002 a Fevereiro de 2003, a temperatura do ar ambiente foi de 8,3 °C e a velocidade do vento foi de 2,3 m/s.

Antes de se procederem aos testes experimentais, foi feita uma análise de temperatura do solo, entre 3 m a 4 m. Verificou-se que a temperatura é estável, e que para 3,5 m variou

entre 25,42 °C a 27,16 °C para as 15 h e 26,56 °C a 28,17 °C para as 3 h. Isto vem reforçar estudos feitos por outros investigadores [53], no qual é concluído que para climas áridos a temperatura do solo abaixo de 2 m de profundidade permanece entre 25-27 °C, no entanto no caso deste estudo experimental o coeficiente de variação é abaixo dos 4 %, o que implica que a variação de amplitude diurna diminua consideravelmente. Foi também analisada a temperatura para 3 m de profundidade onde se verificou que a temperatura média é de cerca de 27 °C, tendo um coeficiente de variação por volta dos 2,8 %, logo isto levou a concluir que, efectivamente, para temperaturas mais profundas o solo pode ser utilizado como fonte de calor no Inverno, e como dissipador de calor no Verão.

Quanto à análise das temperaturas no exterior e interior do quarto de teste, verificou-se que tanto para o período das 3 h da manhã como para o período das 15 h da tarde, a temperatura no interior do quarto é atenuada relativamente à temperatura ambiente. Novembro foi o mês que apresentou maior flutuação dos valores de temperatura, já que os restantes meses se mantiveram consideravelmente mais baixos do que a temperatura exterior.

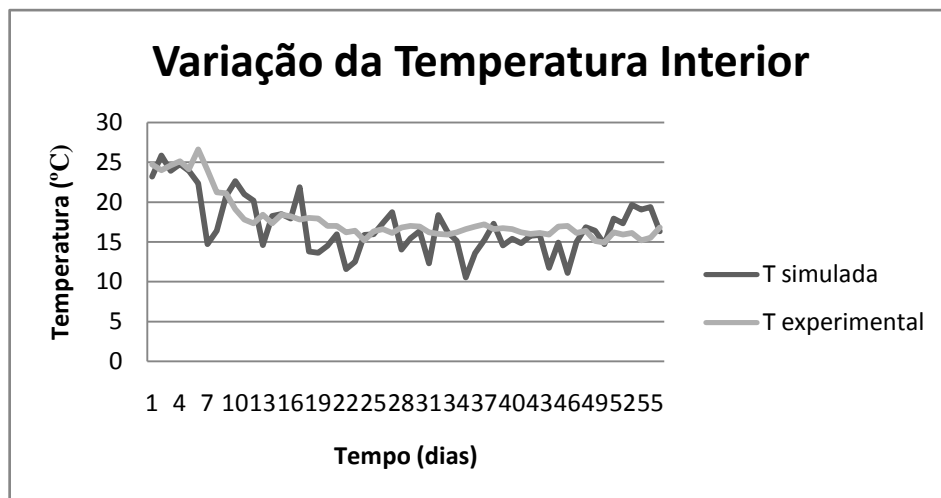


Figura 27: Variação da temperatura interior do espaço às 15 h obtida pelo modelo experimental

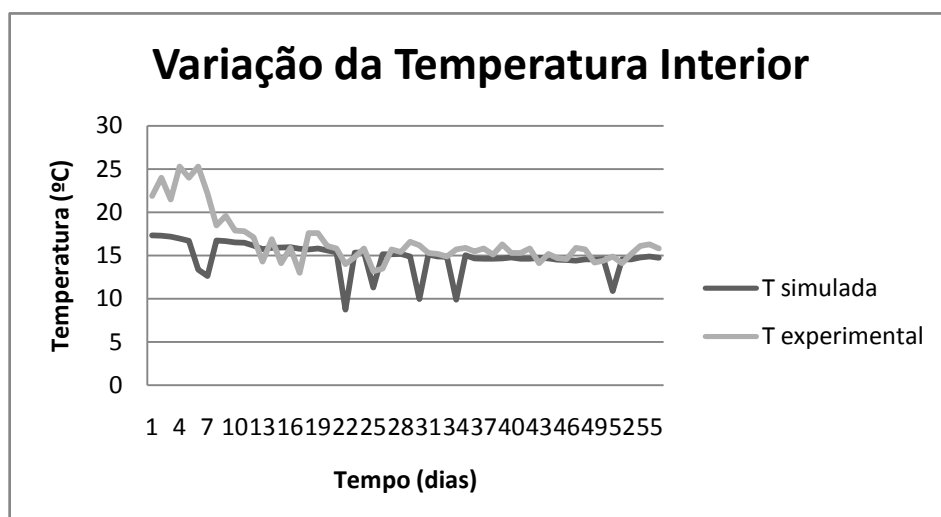


Figura 28: Variação da temperatura interior do espaço às 3 h obtida pelo modelo experimental

Em suma, através deste estudo experimental foi possível concluir que o sistema de tubos enterrados supriu as necessidades de aquecimento, especialmente no mês mais frio, Janeiro. Por outro lado, o facto da diferença de temperatura entre o solo e a temperatura de equilíbrio do quarto ser bastante grande sugere que é possível que o sistema seja ineficiente, principalmente nos meses de Dezembro e Fevereiro. Os autores deste estudo referem que seriam esperadas maiores diferenças entre a temperatura do interior e a temperatura do exterior, e que isto poderá não ter acontecido devido ao comprimento do tubo utilizado, à dissipação das paredes e tecto, já que o quarto foi testado sem nenhum tipo de isolamento e ao longo período de operação do sistema.

3.3.2 Caso de Estudo: Perfil de arrefecimento de um sistema de tubos enterrados em Key West, Flórida

A cidade de Key West fica localizada na ilha de mesmo nome Key West, no estado americano da Flórida, $24^{\circ} 33' 33''$ N $81^{\circ} 47' 2,51''$ O. Segundo o *United States Census Bureau*, a cidade possui uma área de $18,7 \text{ km}^2$ dos quais $14,5 \text{ km}^2$ estão cobertos por terra e $4,3 \text{ km}^2$ por água [54].

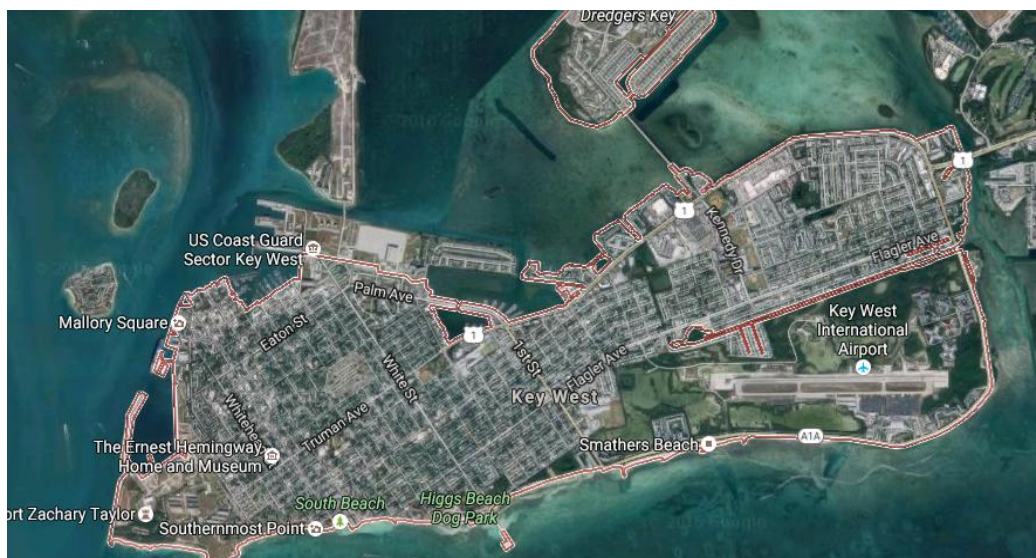


Figura 29: Imagem de satélite da cidade de Key West

Relativamente às condições climáticas, esta cidade possui um clima caracteristicamente tropical considerado AW segundo a classificação climática de Koppen- Geiger. A precipitação

média anual é de 1004 mm, sendo a sua maior ocorrência nos meses de Primavera/Verão ao contrário do que acontece nos meses de Inverno em que a precipitação é mais baixa. A temperatura média anual é de 25,2 °C, sendo normalmente o mês mais quente Agosto, com temperaturas que rondam os 28,8 °C e o mês mais frio Janeiro com uma temperatura de 20,8 °C, havendo uma variação anual de 8 °C. Segue a baixo a representação gráfica do clima na cidade de Key West:

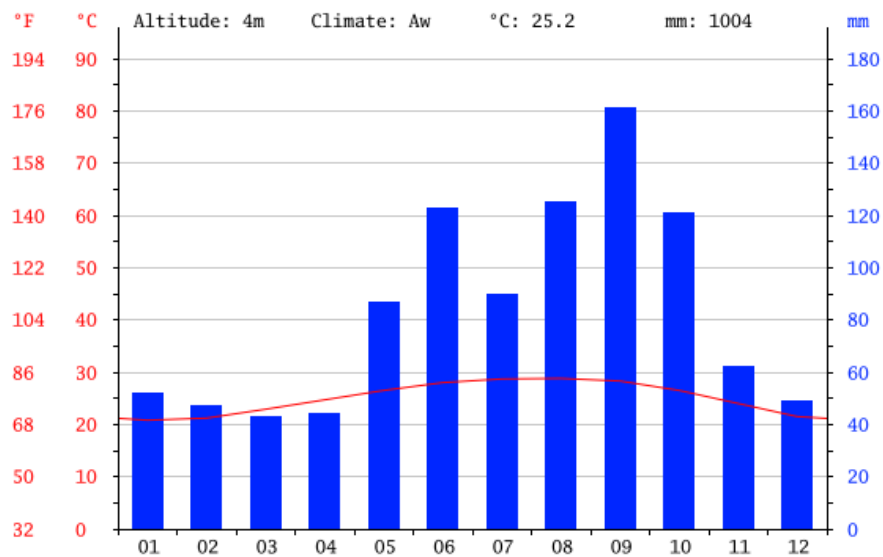


Figura 30: Representação das condições climáticas anuais na cidade de Key West, Flórida [52]

O estudo em análise realizado nos EUA, pretendeu analisar qual é a diminuição na temperatura interior do edifício quando os tubos estão ligados e posteriormente fazer análise paramétrica de quatro variáveis (raio, comprimento, profundidade e taxa de fluxo de ar) de forma a perceber qual o seu impacto na temperatura de saída dos tubos enterrados através do modulo *EarthTubes* do *EnergyPlus*. Foram ainda seleccionadas quatro cidades de diferentes estados de forma a perceber também qual a influência da temperatura e condição do solo no desempenho dos tubos.

Neste sentido, para o presente estudo de validação foi seleccionada uma destas cidades, sendo esta Key West na Flórida, pois após a análise detalhada dos quatro concluiu-se que é a cidade que apresenta um clima mais semelhante ao fornecido pelo ficheiro “*Wheather.data*” presente no *DesignBuilder*, e assim sendo minimizar ao máximo um possível erro associado. Neste caso a diferença será de 1 °C superior no caso do ficheiro fornecido pelo programa.

Relativamente ao edifício simulado foi assumido um edifício residencial com três divisões, uma sala de estar, uma garagem e um sótão com 140 m², 37 m² e 176 m² respectivamente, no entanto apenas se considerou para a análise a divisão relativa à sala de estar. São descritas abaixo as características relativas ao espaço:

- ✓ Altura: 3,05 m;
- ✓ Ganho calorífico interno (iluminação e equipamentos): 5,4 W/m²;
- ✓ Nº de pessoas: 2;
- ✓ Infiltração: 0,25 ACH;
- ✓ Caudal volumétrico de ar: 285 m³/h;
- ✓ Tubos sempre ligados durante o período de análise.

Relativamente aos inputs necessários à simulação são descritos na Tabela 18 seguinte:

Tabela 18: Inputs necessários à simulação do modelo

Summer Design Day	21 de Agosto
Temperatura Média Ambiente	23°C
Orientação	Norte
Condições do solo	Pesado e Húmido T_m : 24,3 °C A_s : 5,0 °C T_0 : 27 dias
Características <i>strandard</i> dos tubos	Raio: 0,075 m; Comprimento: 30 m; Profundidade: 2,5 m; Velocidade do fluxo de ar: 5 m/s

Posto isto são apresentados na Figura 30 apenas os resultados do estudo para a diminuição da temperatura interior no edifício de forma a que seguidamente seja possível proceder à simulação do modelo no *DesignBuilder* e posteriormente seja possível fazer uma comparação dos mesmos resultados de forma a validar o modelo *EarthTube*.

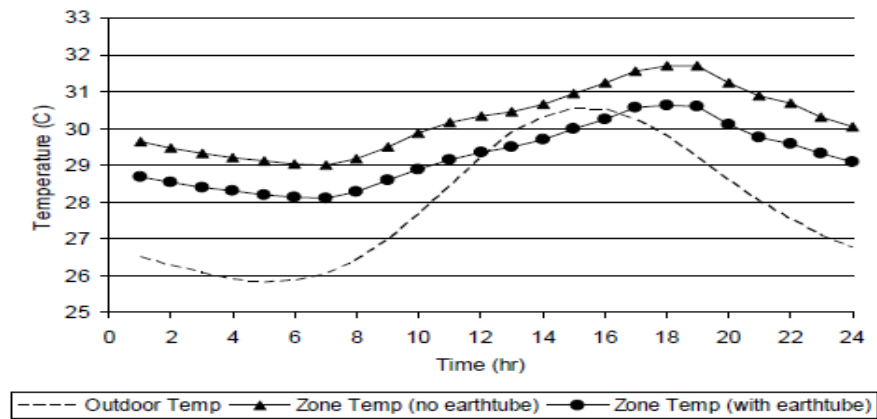


Figura 31: Comparação da temperatura interior da sala de teste com tubos e sem tubos [54]

O estudo concluiu que a temperatura em Key West ao utilizar os tubos diminuiu apenas 1°C, isto porque a cidade apresenta uma temperatura bastante elevada quer do ar ambiente que do solo, sendo 10 °C mais elevada do que nas restantes cidades e daí ser mais difícil atingir uma boa performance no que consta ao arrefecimento. Este estudo sugere então que para este tipo de climas os tubos devam ser colocados a uma profundidade maior, tal como acontece em climas extremos.

Procedemos então a análise no *DesignBuilder*. Visto que este funciona com “interface” do *EnergyPlus* foi possível construir o edifício virtualmente e adicionar todas as características adjacentes:

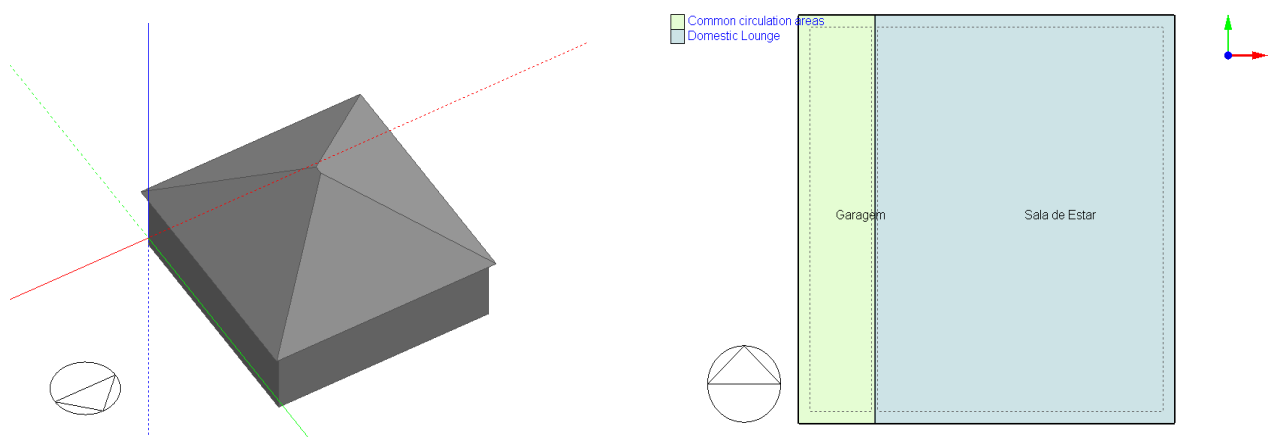


Figura 32: Layout do edifício simulado, Key West, Florida

Visto não terem sido dadas mais informações relativas à sala de teste, no que respeita às opções construtivas e iluminação foram assumidas as opções que se podem considerar melhores práticas do ponto de vista do isolamento térmico nas paredes, piso em contacto com o solo e

tecto, visto que se pressupõe que dado as condições climáticas desta cidade e as elevadas temperaturas os edifícios sejam construídos tendo algum cuidado relativamente a estas questões de forma a proporcionar o maior conforto possível a quem neles habita e o mesmo se depreende para a iluminação.

Relativamente ao sistema de AVAC, o sistema é desligado de forma a perceber especificamente qual é o impacto apenas dos tubos na temperatura interior. É possível na Figura 33 verificar o separador “EarthTube” e analisar em pormenor as opções consideradas para além das especificadas no caso de estudo. De realçar a opção de se considerar a ventilação natural visto que não é referido qualquer tipo de motor de forma a funcionar como *by pass* do sistema. Ainda neste separador de salientar o uso de ventilação mecânica com a opção de três trocas de ar do volume da sala por hora, assim é somente analisada a passagem do ar pelos tubos, diminuindo possíveis incertezas associadas a outros parâmetros.

<input checked="" type="checkbox"/> Include earthtube	
Outside air definition method	6-Design flow rate
Design flow rate (m3/s)	0.07900000
Operation	
Schedule	Copy of Dwell_DomCirculation_Occ
Control	
Minimum zone temperature when cooling (°C)	0.00
Maximum zone temperature when heating (°C)	100.00
Delta temperature (deltaC)	2.00
Fan Electric Consumption Configuration	
Earth tube type	1-Natural
Pipe Specifications	
Pipe radius (m)	0.08
Pipe thickness (m)	0.00
Pipe length (m)	30.00
Pipe thermal conductivity (W/m-K)	200.00
Pipe depth under ground surface (m)	2.50
Soil Heat Transfer Calculations	
Soil condition	1-Heavy and saturated
Average soil surface temperature (°C)	24.30
Amplitude of soil surface temperature (deltaC)	5.00
Phase constant of soil surface temperature	27.00
Term Flow Coefficients	
Constant	1.0000000000
Temperature	30.6000000000
Velocity	5.0000000000
Velocity squared	25.0000000000

Figura 33: Layout descritivo do separador de “EarthTubes” utilizado no modelo

Finalmente após a simulação é possível verificar os resultados na Figura 33. Feita uma comparação com os resultados obtidos pelo modelo em estudo, é possível verificar que estes apresentam um erro associado de 5,98 %. O que se pode dever ao facto do ficheiro climático não

ser exactamente igual, visto que o utilizado no *DesignBuilder* tem uma temperatura relativamente mais elevada como foi explicado anteriormente, assim como as opções construtivas também podem ter influência dado que não são também especificadas por este estudo. No entanto, considera-se que o modelo poderá ter consistência por comparação com este estudo e que tal como no mesmo foi concluído, também se pode considerar um potencial positivo no arrefecimento do espaço embora de forma um pouco ligeira.

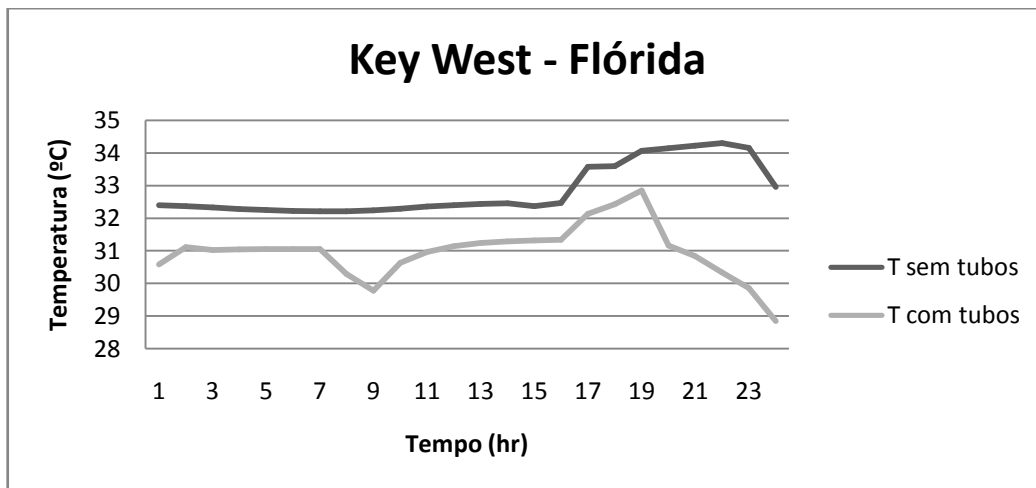


Figura 34: Comparação da temperatura interior da sala de teste com e sem tubos para o modelo simulado no *DesignBuilder*

3.3.3 Caso de Estudo: Perfil de aquecimento de um sistema de tubos enterrados em Bhopal, Índia

A cidade de Bhopal é capital do estado de Madhya Pradesh localizada na Índia, 23° 15' N 77° 25' E. Situa-se nas planícies de Malwa, numa área cheia de vales. Na imagem a seguir é possível verificar que a cidade se encontra junto a um grande lago e que possui um forte coberto vegetal.



Figura 35: Cidade de Bhopal, India vista por imagem satélite

O clima é considerado tropical, segundo a classificação de Koppen-Geiger este é AW. Isto é sustentado pelo facto de que no Verão existe muita ocorrência de chuva, caso que não se verifica nos meses de Inverno, a precipitação média anual é de 1132 mm ocorrendo quase na sua totalidade nos meses de Julho e Agosto. Relativamente á temperatura média anual é de 25,1 °C. Na Figura 36 seguinte é possível verificar em detalhe o clima da cidade.

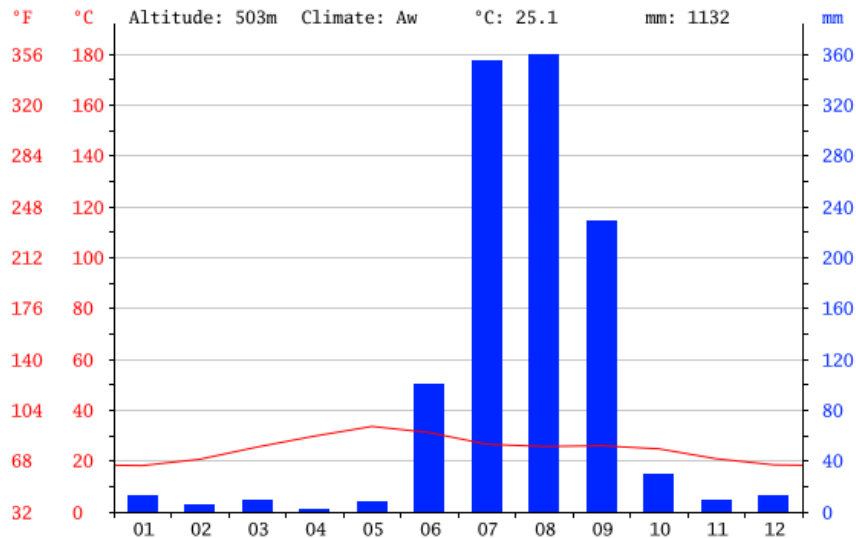


Figura 36: Variação anual da precipitação e temperatura para a cidade de Bhopal, India [52]

Procedendo então à descrição deste caso de estudo, este pretende também fazer a validação de um modelo computacional, CFX 12.0 através da análise do potencial de aquecimento dos sistemas de tubos enterrados. Para tal foi realizado um estudo experimental que apenas consistiu na análise de desempenho dos tubos enterrados, onde através de sensores instalados ao longo do tubo se foi analisando a alteração de temperatura até ao foco principal que foi determinar a temperatura á saída do mesmo. Na imagem seguinte é possível ver a instalação dos tubos enterrados de forma a forma um “*setup*” experimental.

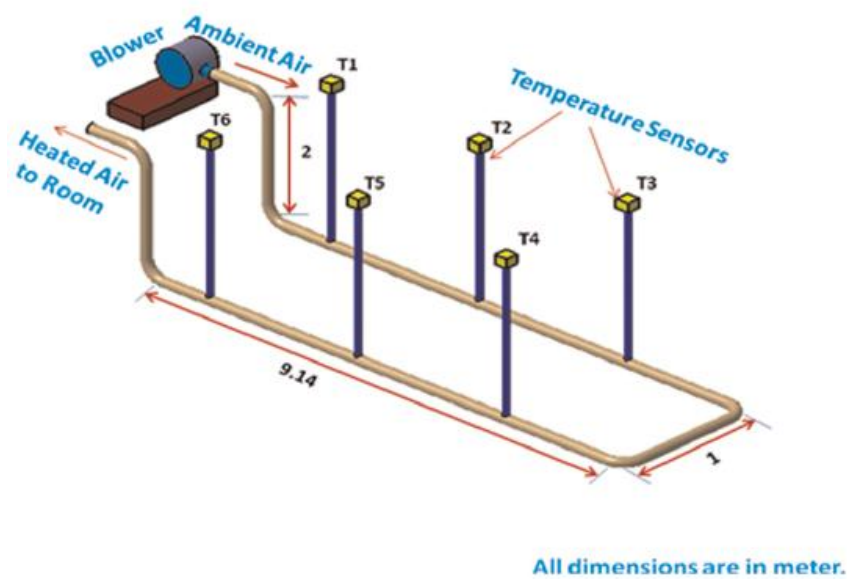


Figura 37: Setup experimental do sistema de tubos enterrados instalado em Bhopal, India Cental [55]

Quanto às características inerentes às condições de análise experimental e aos tubos utilizados foram consideradas as descritas na Tabela 10 seguinte:

Tabela 10: Características dos sistemas de setup experimental

Período de Análise	14 e 29 de Dezembro de 2013
	7 e 12 de Janeiro de 2014
Temperatura Média Ambiente	16,7 °C
Condições do solo	Pesado e seco
Características dos tubos	Raio: 0,0508 m; Comprimento: 19,228 m; Profundidade: 2 m; Material: PVC Velocidade do fluxo de ar: 2 m/s

É de salientar que numa primeira fase o estudo foi feito apenas para um dia, 29 de Dezembro. Dado que o potencial de aquecimento do sistema teve um balanço positivo, sendo desde logo possível a validação do sistema de *CFX 12.0* com um erro de 2,1 %, foram então analisados mais dias para verificar se o sistema mantinha o seu desempenho positivo. Caso que foi possível verificar, pois o sistema de tubos enterrados demonstrou ter em todos os dias um desempenho positivo, conseguindo aumentar a temperatura de saída do tubo comparativamente à temperatura de entrada. Este estudo para além da validação do software, revela um sistema de tubos enterrados para aquecimento conseguirá suprir as necessidades de um edifício e substituir o sistema de ar condicionado convencional.

Posto isto, procedemos então à análise do caso de estudo através do *software* de utilização em estudo. Para tal, como esta análise se debruça apenas sobre a temperatura à saída dos tubos, as características inerentes ao edifício não são relevantes e portanto para a simulação foi considerada uma célula de teste de 10 m x 10 m representada na Figura 38:

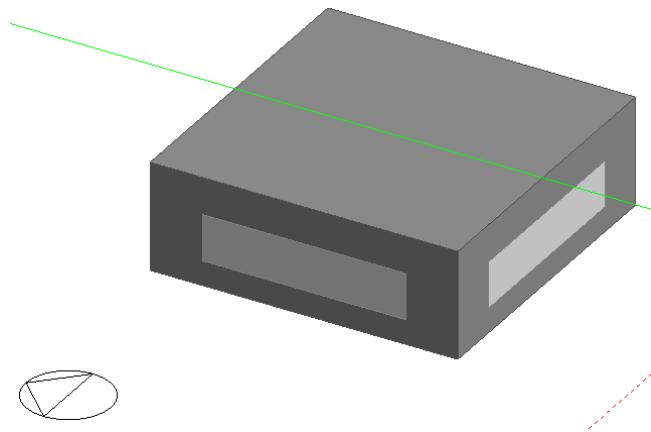


Figura 38: Célula teste usada para o estudo de simulação no DesignBuilder

Relativamente ao separador de AVAC as opções foram o máximo possível as mais aproximadas das definidas pelo *setup* experimental. No entanto neste caso como os *inputs* requeridos pelo módulo “*Earthtube*” não estão todos disponíveis neste *setup*, foi necessário fazer algumas considerações e utilizar como programa auxiliar “*CalSoilSufTemp*” do *EnergyPlus*, para definir as características relativas ao tipo de solo. É apresentado na Figura 39 o painel representativo do módulo “*Earthtube*”. Também de referir neste separador a utilização da ventilação mecânica onde é feita uma renovação de ar por hora.

<input checked="" type="checkbox"/> Include earthtube	
Outside air definition method	1-By zone
Outside air (ac/h)	5.00
Operation	
Schedule	Copy of Office_OpenOff_Occ
Control	
Minimum zone temperature when cooling (°C)	0.00
Maximum zone temperature when heating (°C)	50.00
Delta temperature (deltaC)	3.00
Fan Electric Consumption Configuration	
Earth tube type	1-Natural
Pipe Specifications	
Pipe radius (m)	0.10
Pipe thickness (m)	0.00
Pipe length (m)	19.23
Pipe thermal conductivity (W/m-K)	0.16
Pipe depth under ground surface (m)	2.00
Soil Heat Transfer Calculations	
Soil condition	3-Heavy and dry
Average soil surface temperature (°C)	30.46
Amplitude of soil surface temperature (deltaC)	5.97
Phase constant of soil surface temperature	4.00
Term Flow Coefficients	
Constant	1.0000000000
Temperature	16.7000000000
Velocity	2.0000000000
Velocity squared	4.0000000000

Figura 39: Layout de utilização do módulo “EarthTube” do DesignBuilder

A temperatura à saída do tubo não foi possível obter directamente através das simulações. Para tal foi necessário recorrer a um processo de cálculo explicado a seguir.

Os outputs de resultados relativos aos tubos enterrados que são obtidos pela simulação do *DesignBuilder*, através do ficheiro de leitura “*Design Builder Results Viewer*”, são a potência requerida pelos tubos em W (Q) e o caudal volúmico em m³/s (V). Sabendo estes valores e sabendo também a temperatura do ar ambiente (que se considera como sendo a temperatura do ar à entrada dos tubos), é possível calcular a temperatura à saída do tubo, através da equação:

$$Q = m \times cp \times \Delta t$$

No entanto, é importante salientar que o que é requerido pela equação é o caudal mássico (kg/m³) e o que é fornecido pelo painel de resultados é o caudal volúmico (v/m³). Então considerando a densidade do ar referido no caso de estudo, é possível determinar o caudal mássico através da equação:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Posto a organização destes *outputs*, é possível então proceder ao cálculo da Temperatura de Saída do tubo. Na Figura 40 seguinte é então apresentado os resultados obtidos pelo modelo simulado no *DesignBuilder* e comparados com o modelo experimental. É possível verificar que existe uma boa consonância de resultados, sendo que os dias 29 de Dezembro e 7 Janeiro os resultados ficaram um pouco abaixo do esperado, apresentando um erro de 23 % e 16 %. No entanto é possível verificar excelentes resultados para os dias 14 de Dezembro e 12 de Janeiro em que se obteve um erro de 7 % e 0,046 %, representando este último quase uma correlação perfeita com os resultados experimentais. No entanto é sempre importante referir que estes estudos estão sempre sujeitos a factores e pormenores que podem representar um impacto nos resultados, principalmente no caso dos tubos enterrados o ficheiro climático utilizado, representativo das condições meteorológicas e condições do solo podem ser um factor importante. É de referir que neste caso os dados experimentais foram obtidos no ano de 2013/2014, e o ficheiro climático disponibilizado para a simulação é relativo ao ano de 2002, o que faz com que devido às óbvias alterações do panorama ambiental, aquecimento global aumento de CO₂, possa representar um factor de condicionamento dos dados ideias. Ainda assim é possível uma boa consolidação dos mesmos o que reforça e garante a fiabilidade e viabilidade do sistema de tubos enterrados, capaz de proporcionar um aumento significativo da temperatura à saída dos tubos quando comparada com a temperatura de entrada.

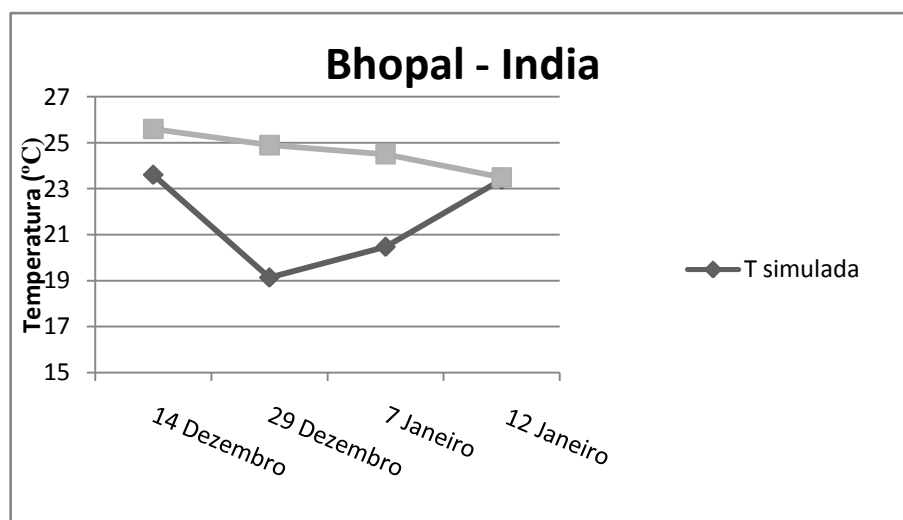


Figura 40: Variação da temperatura de saída dos tubos simulada e experimental

3.3.4 Caso de Estudo: Perfil anual de um sistema de tubos enterrados em Riyadh, Arábia Saudita

Riyadh é a capital e a maior cidade da Arábia Saudita, situa-se num grande oásis o centro da Península Arábica, 24° 38' N 46° 43' E.



Figura 41: Região de Riyadh vista por satélite

Nesta região a atmosfera é árida, ocorrendo raros períodos de precipitação, o clima é desértico e classificado como BWh segundo Koppen e Geiger. A temperatura média anual é de 25,4 °C, sendo o mês mais quente Julho com uma temperatura média de 34,7 °C e o mês mais frio Janeiro com 14,3 °C. Relativamente à escassa precipitação a ocorrência média anual é de 111 mm, sendo que o período de maior precipitação é em Março, 29 mm e de menor precipitação são nos meses de Verão de Junho a Setembro, em que é de 0 mm. Esta informação é representada na Figura 42:

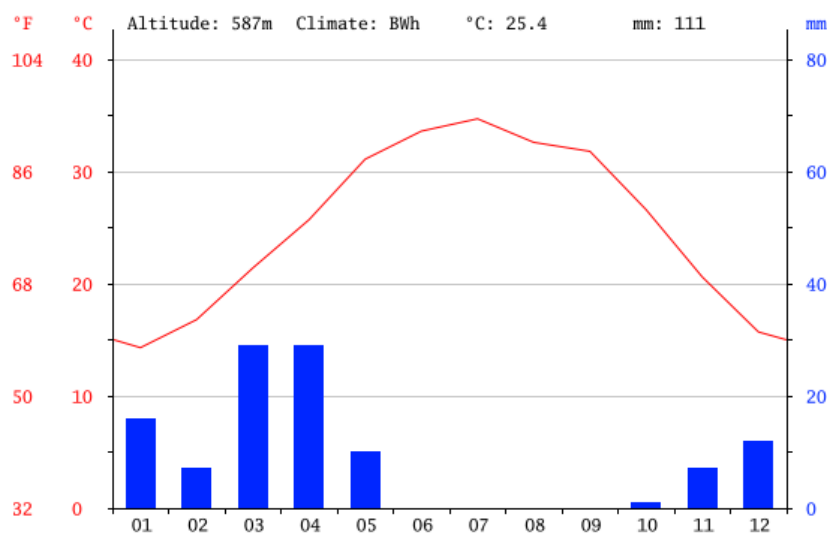


Figura 42: Variação da temperatura e precipitação média anual na cidade de Riyadh [52]

O presente caso de estudo pretendeu analisar três estratégias de ventilação passiva em diferentes locais da Arábia Saudita e que se basearam na ventilação natural, arrefecimento evaporativo e sistemas de tubos enterrados. Foi pensado num protótipo que representasse o edifício a simular como se pode ver na Figura 43 e usado o *EnergyPlus* para a análise de resultados.

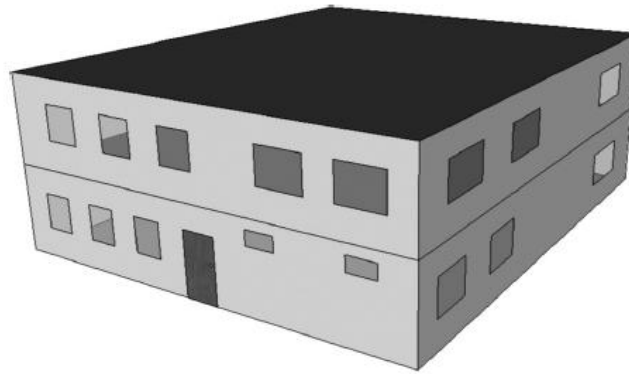


Figura 43: Protótipo utilizado para o caso de estudo [56]

- ✓ Tipo: Residencial
- ✓ Número de pisos: 2
- ✓ Altura: 7,0 m
- ✓ Área: 525 m² (15,0 m x 17,5 m)
- ✓ Janelas: 13, 29 % da área da parede
- ✓ Tipo de Vidro: Simples
- ✓ Opções construtivas para a parede: 20 mm plaster outside + 200 mm concrete hollow block + 20 mm plaster inside
- ✓ Opções construtivas para o telhado: 10 mm built-up roofing + 150 mm concrete roof slab + 12,7 mm plaster inside
- ✓ Piso em contacto com o chão: 150 mm slab on grade
- ✓ Número de ocupantes: 6
- ✓ Gastos de iluminação: 3,0 kW (1º piso) e 2,0 kW (2º piso)
- ✓ Equipamentos: 2,0 kW (1º piso) e 1,0 kW (2º piso)

Estando definidas as características inerentes ao edifício foi necessário uma definição dos inputs requeridos pelo *EnergyPlus* para a simulação do desempenho do sistemas. Como tal são apresentados a seguir os parâmetros assumidos:

- ✓ Design Flow rate (m^3/s) : 1
- ✓ Minimum zone temperature when cooling ($^{\circ}\text{C}$): 22
- ✓ Maximum zone temperature when heating ($^{\circ}\text{C}$): 24
- ✓ Delta temperature ($^{\circ}\text{C}$): 5
- ✓ Pipe radius (m): 0,25
- ✓ Pipe thickness (m): 0,01
- ✓ Pipe length (m): 100
- ✓ Pipe thermal conductivity (W/m K): 50
- ✓ Pipe depth underground surface (m): 2
- ✓ Soil condition: Heavy and Dry
- ✓ Average soil surface temperature ($^{\circ}\text{C}$): 27,86
- ✓ Amplitude of soil surface temperature ($^{\circ}\text{C}$): 6,849
- ✓ Phase constant of soil surface temperature (days): 329
- ✓ Constant term flow coefficient: 0,606
- ✓ Temperature term flow coefficient: 0,02019
- ✓ Velocity term flow coefficient: 0,00059

Sendo definidas as características necessárias à simulação do modelo, esta é realizada ao longo de um ano e comparando a temperatura de entrada com a temperatura de saída dos tubos. Os resultados são possíveis de verificar na figura abaixo. Este estudo revelou a diferença de temperatura entre a entrada e saída é de cerca de 2°C , o que apesar de ser positivo pois revela uma compensação do sistema, acaba por ficar um pouco à quem dos resultados esperados, e neste caso conclui-se que o sistema de tubos enterrados não consegue colmatar as necessidades do edifício comparativamente ao sistema convencional.

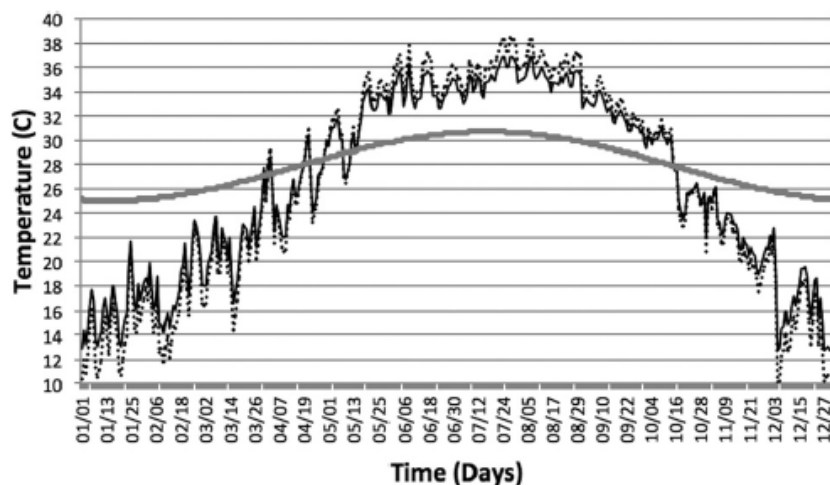


Figura 44: Variação anual da temperatura de entrada e saída dos tubos em Riyadh

Posto esta análise, procede-se então à comparação destes resultados com os resultados simulados no *DesignBuilder*. É possível ver na imagem seguinte o modelo virtual do edifício, e dado que este é apenas um interface do *EnergyPlus*, os inputs requeridos são exactamente os mesmos que são introduzidos no modelo “*EarthTubes*”. De salientar que se utilizou uma ventilação mecânica com três renovações de ar por hora.

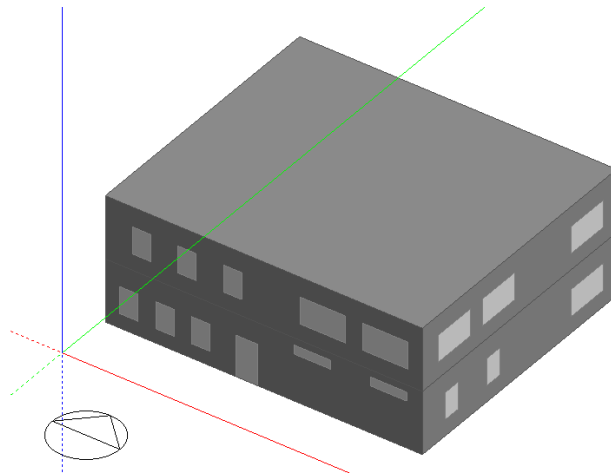


Figura 45: Modelo Virtual criado no *DesignBuilder* para o processo de simulação

Feita a simulação do modelo, tal como foi explicado no caso de estudo anterior foi necessário recorrer ao “*Design Builder Results Viewr*” para ser possível retirar os dados necessário ao cálculo da equação $Q = mcp(T_1 - T_2)$. Assim sendo o gráfico seguinte revela os resultados obtidos. Demonstra que o sistema se revelou um pouco ineficiente nos meses de Verão não conseguindo diminuir a temperatura de saída relativamente à de entrada no tubo. Posto esta questão, foi feita uma análise fazendo variar os valores introduzidos relativos ao controlo do sistema, e percebeu-se que o facto do controlo usado no estudo ser muito limitado (entre 22 °C e 24 °C) e como a temperatura é bastante elevada faz com que por vezes o sistema não funcione, já se forem usados intervalos de controlo maiores como entre 0 °C e 100 °C o sistema está sempre ligado para qualquer temperatura conseguindo assim suprir as necessidades do edifício.

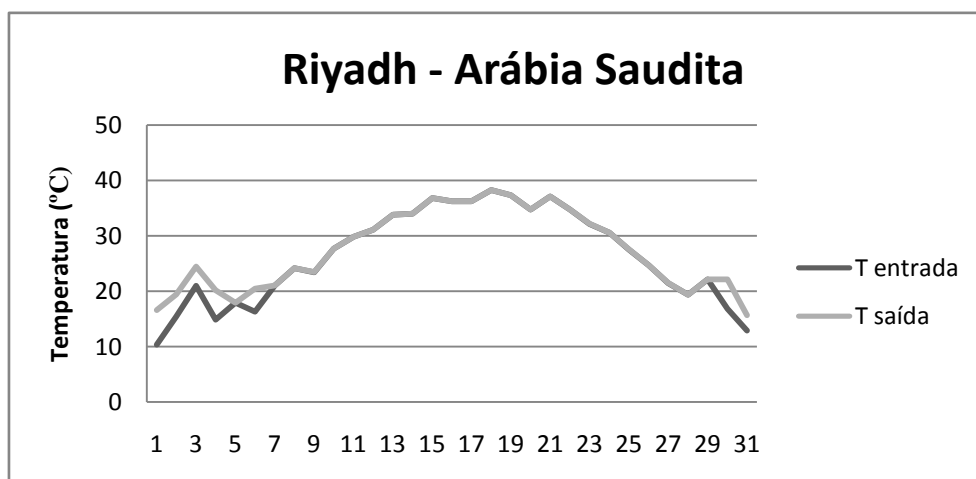


Figura 46: Variação da temperatura de entrada e saída dos tubos para a cidade de Riyadh pelo

DesignBuilder

3.3 Conclusão

Após a análise de sensibilidade e de quatro estudos em regiões completamente diferentes de forma a validar o modelo “*EarthTube*” do *DesignBuilder*, foi bem conseguida. Apesar de nem sempre os valores serem exactamente os esperados e estarem em perfeita consonância, o erro associado à comparação entre modelo é abaixo dos 10% o que revela que o programa pode ser consistente e viável para futuras análises. E tal como foi explicado é importante ter em consideração os factores alheios que podem ser uma condicionante nestes estudos, pois sabe-se que o clima é muito importante para o desempenho dos mesmos e por vezes o facto dos ficheiros climáticos não corresponderem exactamente pode ser um factor de risco para o sucesso da validação, assim como a não utilização de outro tipo de soluções passivas.

Capítulo 4

*Simulação de um sistema de tubos enterrados em
cidades de Portugal*

4. Simulação de um sistema de tubos enterrados em cidades de Portugal

Resumo do Capítulo

Ao longo deste capítulo será feita uma análise para Portugal, em que se pretende perceber até que ponto é viável a instalação de um sistema de tubos enterrados num edifício idealizado no país. Para tal será projectado um edifício modelo e o mesmo será simulado com o sistema de AVAC + Tubos enterrados, apenas tubos enterrados e apenas AVAC para três cidades do país, nomeadamente Bragança, Porto e Beja. Assim será possível perceber de facto as diferenças de desempenho dos mesmos.

4.1 Caracterização do Clima em Portugal

Portugal Continental localiza-se na extremidade SW da Península Ibérica e faz fronteira a N e E com Espanha sendo limitado a S e W pelo Oceano Atlântico Norte. Tem a forma de um quadrilátero que adelgaça progressivamente do norte para o sul e abrange uma área de 89 060 km², pouco mais da sétima parte de toda a Península. A extensão Norte-Sul (de 42°09' até 36° 58' N) atinge os 561 km e a máxima extensão Leste-Oeste (de 6° 12' até 9° 30' W) é de 218 km. A sua geografia é denominada por uma mistura de influências Atlântica e Mediterrânea, com a primeira a dominar a parte Norte do país e a segunda a parte Sul, que se traduz no clima, flora e fauna [57]. Segundo a classificação de Koppen, baseada nas temperaturas médias de cada região, o clima de Portugal Continental divide-se em duas regiões: uma de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão Seco e quente (Csa) e outra de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e pouco quente (Csb) (Figura 47) [58]. As suas características podem ser afectadas por vários factores, tais como, a influência da latitude, do Oceano Atlântico, da massa continental da Península Ibérica e da altitude. Todos estes factores contribuem para que haja uma grande diversidade climática [59]:

- No Norte Litoral e na Região Autónoma dos Açores, predomina o clima temperado mediterrâneo de influência atlântica, com maior quantidade de precipitação e menor duração da estação seca;
- No Interior, predomina o clima temperado mediterrâneo de influência continental, com menor quantidade de precipitação e maior amplitude térmica anual;

- No Sul de Portugal Continental e na Região Autónoma da Madeira, as características do clima temperado mediterrâneo são mais acentuadas;
- Nas áreas de montanha mais elevadas, como a Serra da Estrela, a altitude faz com que se registem temperaturas mais baixas e precipitações mais abundantes, por vezes, com queda de neve, no Inverno.

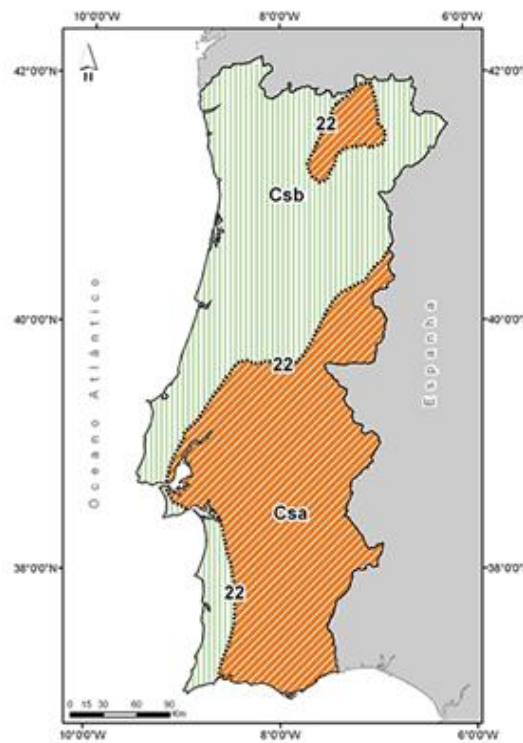


Figura 47: Clima de Portugal Continental, segundo a classificação de Koppen [58]

O país tem à volta de 2500-3200 horas de sol por ano, e uma média de 4-6 horas no Inverno e 10-12 horas no Verão, com valores superiores no sudeste e inferiores no noroeste. Os meses de Primavera e Verão são ensolarados e as temperaturas são altas durante os meses secos de Julho e Agosto, podendo passar os 40 °C em grande parte do país, especialmente no interior Alentejano. Em algumas regiões, como nas bacias do Tejo e do Douro, as temperaturas médias anuais podem chegar a atingir os 20 °C. No Inverno as temperaturas inferiores a -10 °C e os nevões ocorrem com alguma frequência em pontos restritos do país tais como Serra da Estrela, Serra do Gerês e Serra de Montesinho. Nos arquipélagos da Madeira e Açores a temperatura tem uma faixa mais estreita, com temperaturas médias anuais que excedem os 20 °C. A precipitação total anual média varia de pouco mais de 3000 mm nas montanhas do norte a menos de 600 mm em zonas do sul do Alentejo [59].

Como se pode ver através das Figuras 48 e 49, através da análise espacial baseada nas normais de 1961/90 a temperatura média anual varia entre cerca de 7°C em terras altas do interior norte e centro e cerca de 18 °C no interior litoral sul, assim como é possível também ver que relativamente à precipitação média anual esta tem valores mais altos no Minho e Douro Litoral e valores mais baixos no interior do Baixo Alentejo [58].

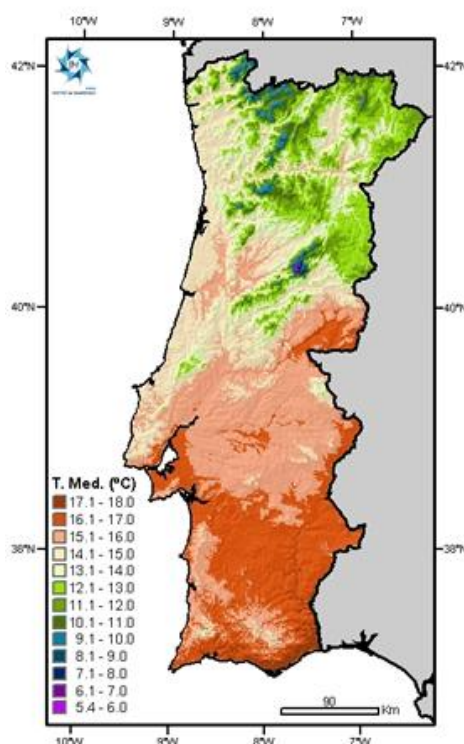


Figura 48: Temperatura média anual [58]

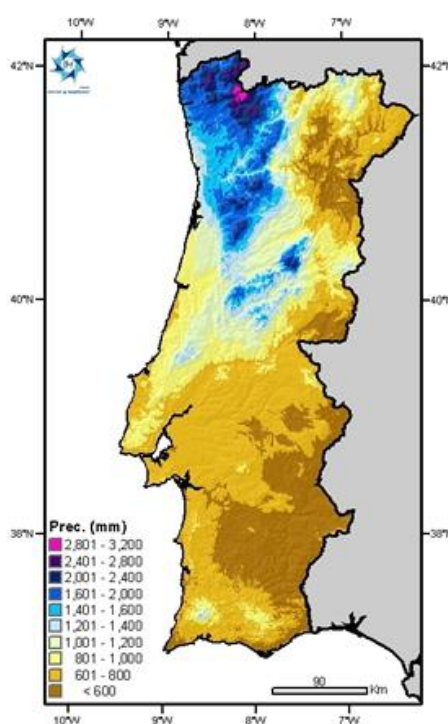


Figura 49: Precipitação acumulada anual [58]

Quanto ao tipo dos solos em Portugal, estes geralmente são jovens, pouco desenvolvidos, com características que em certos casos reflectem predominantemente as rochas subjacentes, noutras o relevo ou o clima.

A Figura 50 mostra a distribuição do tipo de solo em Portugal Continental, segundo a classificação apresentada no Atlas do Ambiente e que segue a classificação da FAO [59]. É uma classificação em que os solos são divididos em nove grandes grupos, a saber, (1) solos orgânicos; (2) solos condicionados por influência humana; (3) solos condicionados pelo material parental; (4) solos condicionados pelo relevo; (5) solos condicionados pela sua juventude; (6) solos condicionados por secas sazonais ou clima (sub)tropical e longa evolução; (7) solos condicionados por lixiviamento limitado; (8) solos condicionados por ambiente do tipo de Estepe; (9) solos condicionados por movimentos pronunciados de argilas ou materiais férricos e húmicos. Em Portugal encontram-se basicamente solos do grupo 3 (Arenosos e Vertissolos), 4(Leptossolos, Fluvissolos e Regossolos), 5 (Cambissolos), 7 (Solonchaks) e grupo 9 (Luvisolos, Planossolos e Podzois).

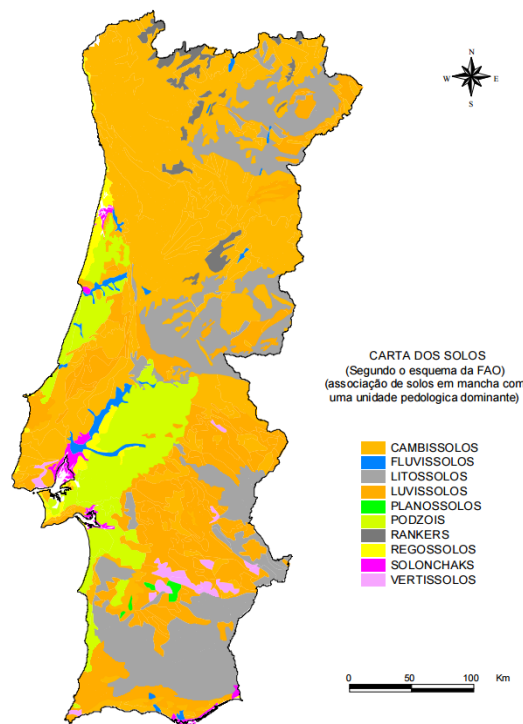


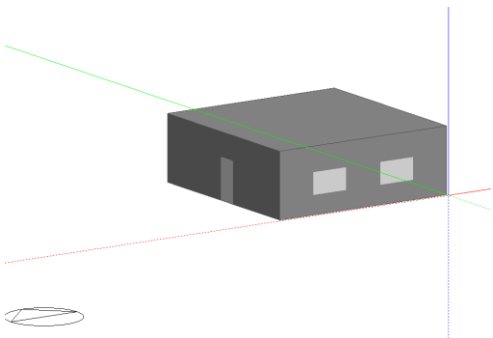

Figura 50: Carta de solos de Portugal segunda a classificação FAO [59]

Feita uma abordagem sobre o tipo de clima em Portugal, no âmbito deste projecto de dissertação, pensou-se em fazer um estudo paramétrico para algumas cidades do território continental, entre elas, Bragança, Porto e Beja, de forma a abranger todo o território de Norte a Sul. Através do *DesignBuilder* será desenvolvido uma “célula de teste” e com a auxílio do Modelo *EarthTube*, anteriormente validado, será possível perceber se será pertinente a utilização de tubos enterrados em Portugal.

4.2 Simulação do sistema de tubos enterrados

Para o desenvolvimento do estudo paramétrico em Portugal, utilizou-se como é referido anteriormente uma célula de teste, desenvolvida através do *software DesignBuilder*. Esta pretende demonstrar o desempenho dos tubos enterrados em algumas cidades de Portugal, sendo o modelo da célula fixo para todos os estudos. Na Tabela 14 é representada a célula teste e respectivas janelas e portas.


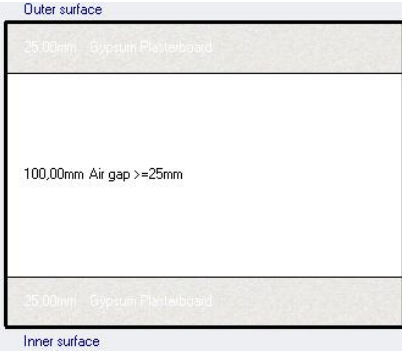

Tabela 11: Modelo da Célula de Teste desenvolvido através do *software DesignBuilder*


	
<p>Área da célula de teste: 10 m x 10 m</p> <p>Dimensão da Porta: 2,20 m x 1 m</p> <p>Dimensão das Janelas: 2 m x 1,19 m</p>	

A célula de teste possui uma área de 100 m², uma porta de madeira com espessura de 0,04 m e duas janelas de madeira com uma espessura de 0,02 m. No que respeita ao tipo de vidro utilizado nas mesmas, optou-se por uma solução genérica de vidro duplo “*Generic Clear 3mm; Air*

Gap 13 mm; Generic Clear 3 mm". Relativamente às opções construtivas escolhida para os vários componentes da célula, estas são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Opções construtivas da célula de teste

Componentes	Opções Construtivas	Espessura (m)	U (W/m K)	Template
Parede Exterior	Brickwork, OuterLeaf	0,1	0,398	
	Cork Board	0,08		
	ConcreteBlock (Medium)	0,1		
	GypsumPlatering	0,01		
Parede Interior	Gypsum Plasterboard	0,025	1,563	
	Airgap>=25 mm	0,1		
	GypsumPlasterboard	0,025		
Tecto	Cork Board	0,01	0,207	
	Mineral fibre/wool - wool	0,15		
	Cast Concrete (Lightweight)	0,1		
	Airgap >=25 mm	0,2		
	Plasterboard	0,013		

Pavimento	EPS Expanded Polystyrene (Standard)	0,15	0,221	
	Cast Concrete	0,1		
	Floor/Roof Screed	0,05		
	Timber Flooring	0,05		

As opções construtivas foram feitas com bases na escolha de componentes que atribuísem ao modelo, os melhores valores do coeficiente de transferência de calor (U), para assim ser possível ter um edifício com um desempenho energético mais eficiente. É também de salientar que muitos dos componentes utilizados foram à base de madeira ou cortiça, isto também se prendeu com as questões de desempenho energético do modelo, pois a cortiça é um excelente isolante térmico para além de todas as suas restantes vantagens, quer em termos acústicos, económicos, e principalmente ambientais, já que é o recurso renovável mais abundante que Portugal oferece. Foram também definidas temperaturas de *Setpoint* e *Setback* para aquecimento e arrefecimento, apresentadas na Tabela 13:

Tabela 13: *Setpoint* e *Setback* de aquecimento e arrefecimento do edifício modelo

<i>Setpoint</i> de Aquecimento (°C)	22
<i>Setback</i> de Aquecimento (°C)	20
<i>Setpoint</i> de Arrefecimento (°C)	25
<i>Setback</i> de Arrefecimento (°C)	30

Esta análise foi feita ao longo de um ano de forma a perceber o desempenho dos tubos em período de aquecimento e arrefecimento. Foram escolhidos locais que possuísem propositadamente um clima diferente, sendo que Bragança e Porto localizam-se no Norte do país e Beja no Sul, e são cidades com características climáticas relativamente diferentes.

Para uma melhor percepção da viabilidade do sistema de tubos enterrados, é considerado a instalação de um sistema de AVAC e separadamente serão analisados os seus desempenhos para suprir as necessidades de conforto do edifício modelo.

Relativamente às características do sistema de AVAC escolhido são as seguintes:

- ✓ *VRF heating/cooling, plus DOAS with heat recovery*
- ✓ *COP aquecimento: 3*
- ✓ *COP arrefecimento: 3*
- *Energia elétrica
- ✓ Período de Utilização: 5 dias/semana entre as 7h-18h

Para a simulação do sistema com tubos enterrados e tendo em conta também a análise de sensibilidade feita no Capítulo 3 são consideradas as seguintes características relativamente aos tubos:

- ✓ Raio: 0,5 m;
- ✓ Espessura: 0,05 m;
- ✓ Comprimento: 20 m;
- ✓ Material do Tubo: Aço;
- ✓ Profundidade: 2 m.

Estas características são fixas, variando apenas os restantes parâmetros presentes no painel de simulação dos *Earthtube*, tais como as condições do solo e fluxo de ar, que logicamente variam de local para local. Neste sentido também foram consideradas diferentes renovações de ar sendo que há locais mais quentes que necessitam de um número maior de renovações de ar caso que pode não acontecer sempre. O sistema foi considerado em total funcionamento durante 24 h/dia, e tendo também um sistema de ventilação mecânica ligado.

4.2.1 Bragança

Tal como foi referido no Capítulo 3, a cidade de Bragança localiza-se na região Norte de Portugal, possui um clima quente e temperado (mediterrâneo), com Invernos muito chuvosos, sendo a sua precipitação média anual de 744 mm e com uma temperatura média anual de 11,6 °C, sendo normalmente Agosto o mês com temperatura mais elevada e Janeiro o mês com temperatura mais baixa. Na Figura 51 é possível analisar em pormenor as temperaturas e precipitação ao longo do ano:

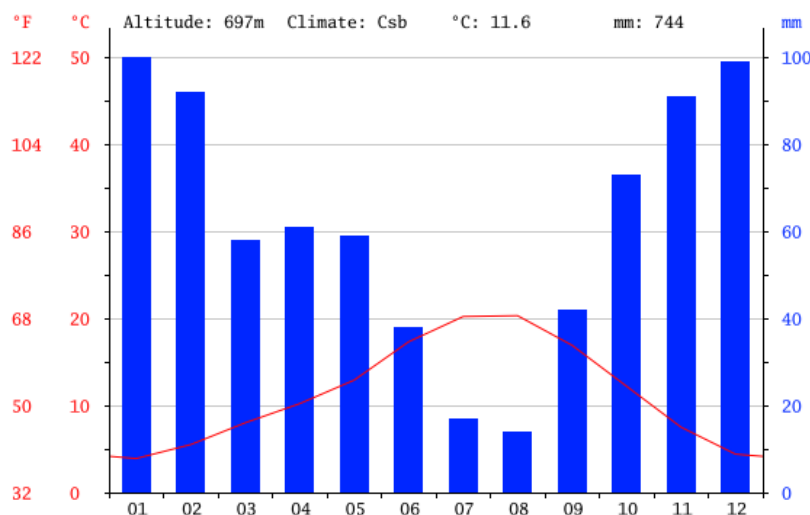


Figura 51: Variação da precipitação e temperatura ao longo do ano em Bragança. [52]

Tendo em conta a carta de classificação do solo apresentada na Figura 50, considera-se o solo em Bragança como sendo tipicamente pesado e húmido. Posto isto, através do separador “CalSoilSurfTemp” obtêm-se os seguintes *inputs*:

- ✓ Average soil surface temperature (°C): 13,95
- ✓ Amplitude of soil surface temperature (°C): 8,6
- ✓ Phase constant of soil surface temperature (days): 31

De acordo com o ficheiro “whether.data”, a temperatura média anual é de 12,2 °C e a velocidade do vento neste dia foi de 2,6 m/s. Na figura seguinte possível verificar a variação da temperatura interior com o sistema de tubos enterrados e AVAC em funcionamento:

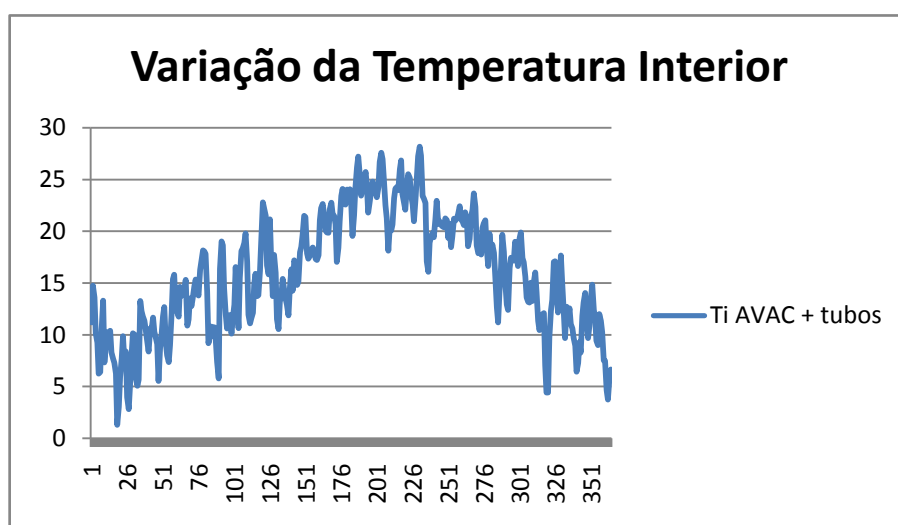


Figura 52: Variação da Temperatura interior para a cidade de Bragança

Após a simulação analisou-se o consumo de energia anual do sistema convencional de AVAC a trabalhar conjuntamente com o sistema de tubos enterrados:

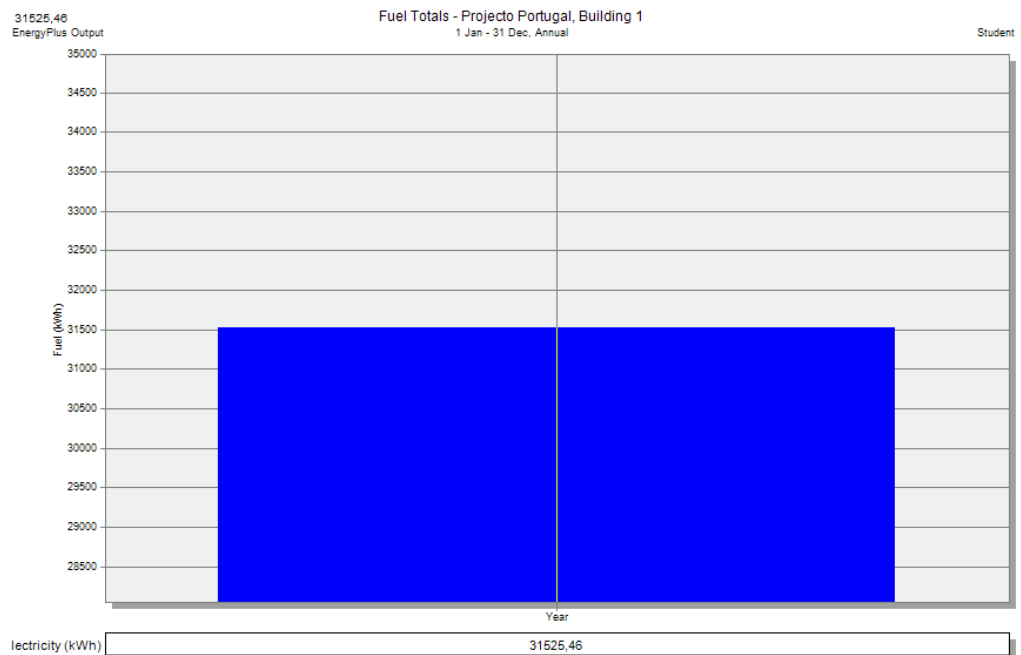


Figura 53: Consumo anual de energia de um sistema de AVAC + Tubos na cidade de Bragança

Verificou-se ainda a variação anual da temperatura interior com os sistemas a trabalharem isoladamente, apresentando um gasto anual de 16538, 97 kWh apenas com sistema de AVAC e de 9404,55 kWh apenas com tubos.

4.2.2 Porto

A cidade do Porto situa-se no noroeste de Portugal, 41° 9' N 8° 36' 40'' O. O clima é considerado Csb pela classificação de Koppen e Geiger, sendo ameno e geralmente quente e temperado. Nesta região a precipitação média anual é de 1178 mm, ocorrendo a maior parte no mês de Janeiro. Relativamente à temperatura média anual é de 14,4 °C, sendo a temperatura mais elevada em Agosto e a mais baixa em Janeiro, 19,6 °C e 9,1 °C respectivamente. É feita uma representação gráfica destes dados, visível a seguir na Figura 54:

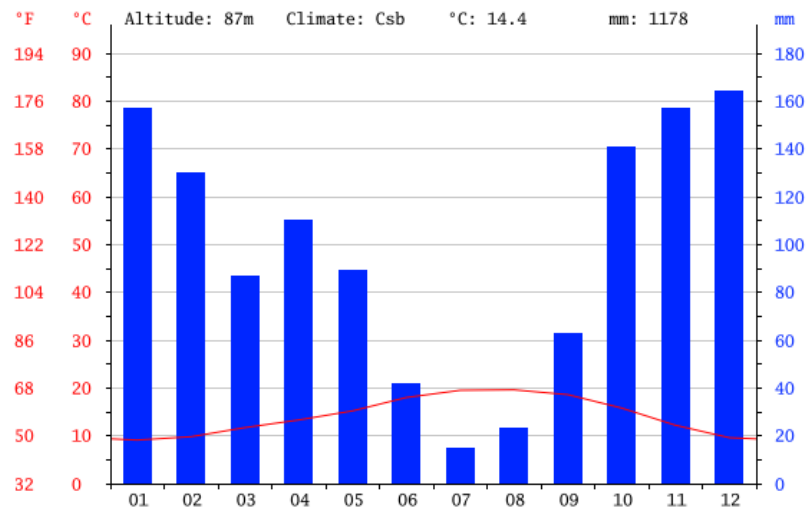


Figura 54: Variação da Temperatura e precipitação média anual na cidade de Porto [52]

Relativamente à classificação do solo a região de Porto possui um solo “Pesado e Saturado”, dada a sua localização costeira. Através destes dados obtiveram-se os seguintes *inputs*:

- ✓ *Average soil surface temperatura (°C): 15,59*
- ✓ *Amplitude of soil surface temperature (°C): 4,54*
- ✓ *Phase constant of soil surface temperature (days): 3*

A temperatura média anual na cidade do Porto foi de 17,3 °C e a velocidade do vento de 2,9 m/s. Numa primeira análise verificou-se a variação de temperatura interior quando aplicado um sistema de tubos enterrados e o sistema de AVAC e é possível ver esta variação na Figura 55:

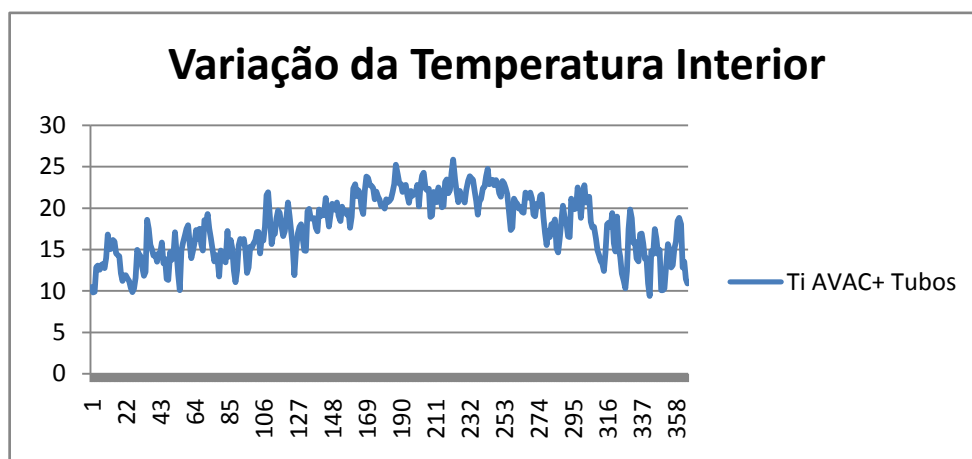


Figura 55: Variação da Temperatura interior na cidade de Porto

Na Figura 56 é representado o consumo de energia gasto pelo sistema de AVAC em funcionamento com o sistema de tubos enterrados:

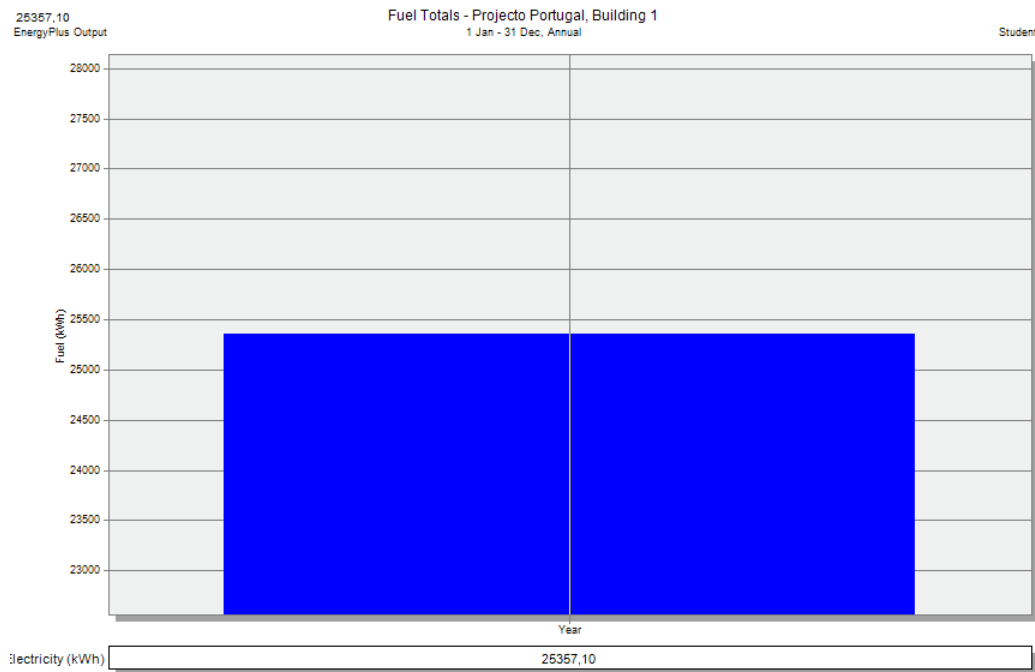


Figura 56: Consumo de energia ao longo de um ano para a cidade do Porto

Através das restantes simulações verificou-se o consumo de energia apenas com tubos e apenas com sistema AVAC, sendo os resultados obtidos de 9400 kWh e 14088,17 kWh respectivamente.

4.2.3 Beja

A cidade de Beja faz parte da região do Alentejo e sub-região do Baixo Alentejo, 38° 01' N 7° 52' O. O clima é considerado o mais quente do país devido à sua distância da costa, e sendo classificado como Csa, segundo Koppen Geiger. A precipitação ocorre mais no Inverno, sendo a sua média anual de 581 mm, sendo o período de maior precipitação o de Dezembro com 85 mm. Quanto à temperatura média anual é de 16,1 °C, registando-se maiores valores no mês de Agosto, com 23,8 °C e as temperaturas mais baixas 9,6 °C, como se pode verificar na Figura 57:

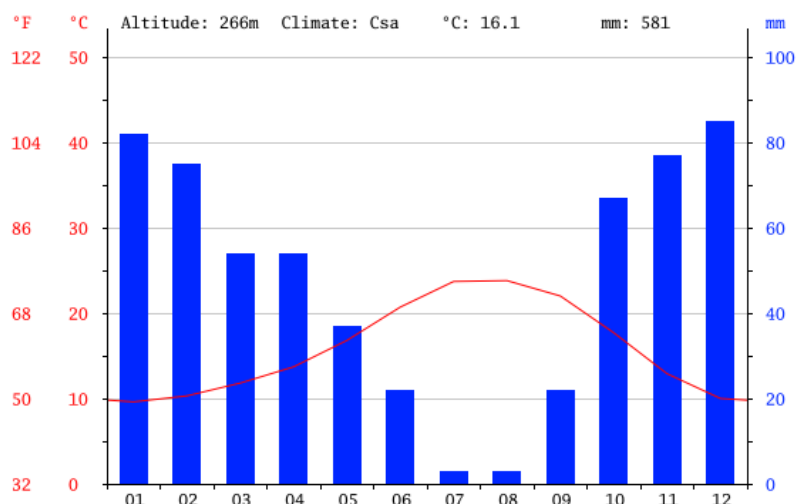


Figura 57: Variação da temperatura e precipitação média anual [52]

Beja é uma zona a sul de Portugal e o solo característico desta região é considerado “Leve e Seco” e após a análise no módulo “CalcSoilSurfTemp” obtiveram-se os seguintes inputs:

- ✓ Average soil surface temperatura (°C): 19,22
- ✓ Amplitude of soil surface temperature (°C): 11,05
- ✓ Phase constant of soil surface temperature (days): 54

É também importante referir que para a cidade de Beja optou-se por considerar uma renovação de ar pelos tubos de 5 ac/h, devido a ser um local com uma temperatura mais elevada e de se necessitar de mais quantidade de ar para conseguir os resultados pretendidos. A variação da temperatura média anual para Beja foi de 15,81 °C com uma velocidade média de 2,9 m/s. Através da Figura 58 é possível verificar a variação da temperatura interior com os sistemas acoplados de tubos enterrados e AVAC:

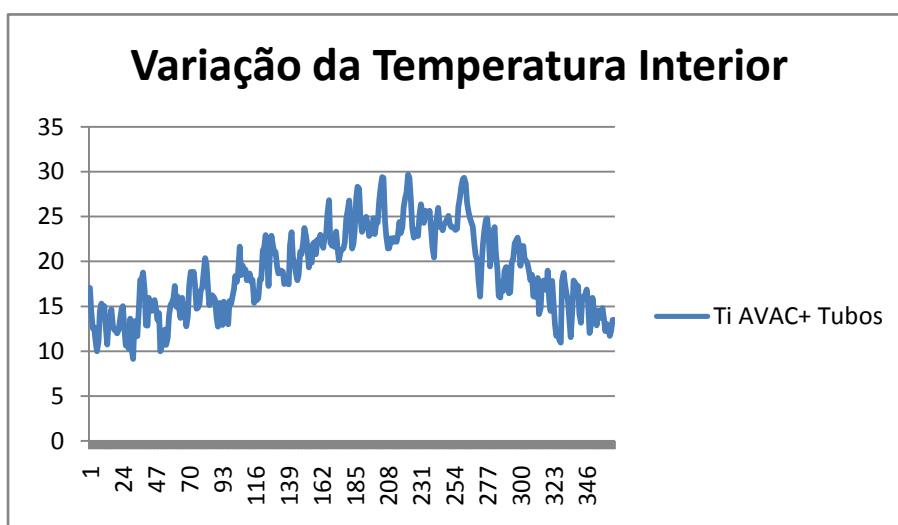


Figura 58: Variação da temperatura interior ao longo do ano

É representado na Figura 59 o consumo anual de energia do sistema de AVAC a trabalhar em conjunto com um sistema de tubos enterrados.

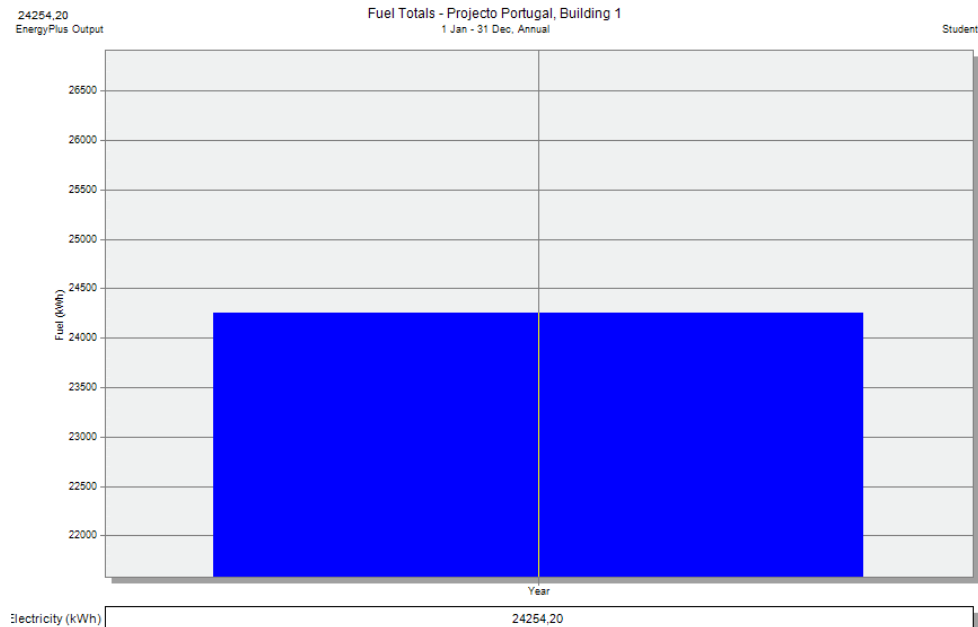


Figura 59: Consumo de energia pelo sistema AVAC + tubos na cidade de Beja

Verificou-se que o sistema apenas com tubos consome 9404,01 kWh e que apenas com AVAC consome 14104,04 kWh.

Finalmente, ainda de forma a perceber melhor os resultados, na Figura 60 é apresentada uma compilação relativa às comparações das variações de temperatura interior em Bragança, Beja e Porto apenas com tubos e apenas com AVAC, e através da mesma é possível concluir que os tubos são eficazes principalmente nos meses de Verão e em climas mais quentes como é o caso da cidade de Beja, no entanto o seu desempenho desce drasticamente não conseguindo suprir as necessidades nos meses de Inverno.

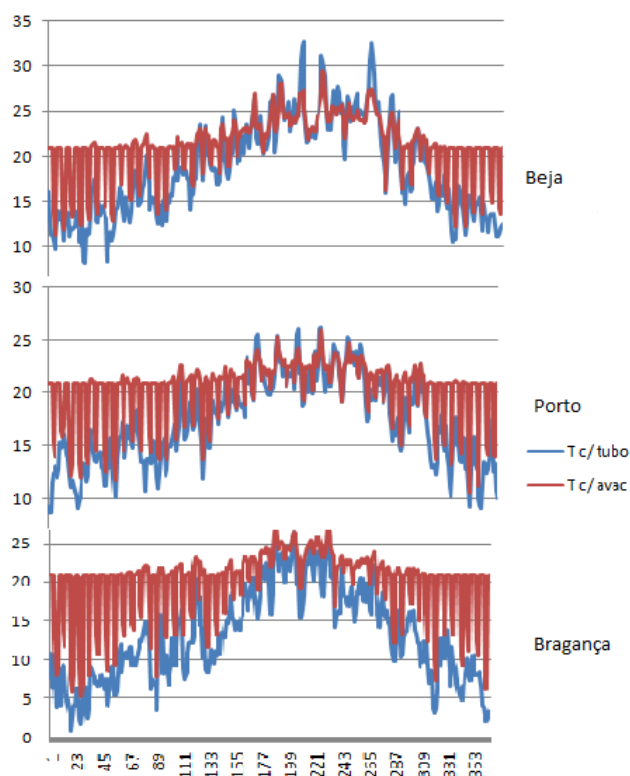


Figura 60: Variação da temperatura diária no interior do edifício modelo

4.3 Conclusão

Através da análise da utilização do sistema de tubos enterrados em Portugal pelo módulo *Earthtube* no *DesignBuilder*, foi possível verificar de que forma este são mais eficazes e onde representam uma “mais valia”. Quando analisado o desempenho do sistema de AVAC + tubos enterrados percebeu-se que o sistema apresenta uma melhoria no seu desempenho no Inverno quando comparado apenas com o sistema de tubos enterrados, tal como nos meses de Verão o sistema revela melhorias quando comparado com o sistema de AVAC apenas. Foi visível que quer para o Inverno quer para o Verão o sistema é eficaz conseguindo suprir as necessidades de aquecimento e arrefecimento. Verificou-se que a cidade onde o impacto dos tubos foi menor foi em Bragança, obtendo-se melhores desempenhos na cidade do Porto e Beja, sendo de salientar que o sistema é mais eficaz nos meses de Verão. No entanto para ter uma percepção da viabilidade deste sistemas quando comparado com um sistema de convencional, através da simulação do mesmo foi possível perceber que na maior parte do ano o sistema de AVAC tem um

desempenho superior ao dos tubos enterrados que se revelam menos eficazes, sendo apenas o seu desempenho superior nos meses de Verão para a cidade de Beja.

Capítulo 5

Considerações Finais e Trabalhos Futuros

5. Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Resumo do Capítulo

Ao longo deste capítulo pretende-se proceder às considerações finais relativas à tese apresentada e as suas conclusões respectivamente. Serão também apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros com vista ao desenvolvimento de investigação dos sistemas de tubos enterrados.

5.1 Considerações Finais

A investigação sobre o desempenho de sistemas de tubos enterrados tem sido crescente, explorada cada vez mais em estudos que se debruçam sobre o seu impacto em edifícios ou no que respeita aos *softwares* em que seja possível perceber previamente a viabilidade dos mesmos. Neste sentido, ao longo desta tese o objectivo principal foi a validação de um modelo desenvolvido pelo software *EnergyPlus*, e disponibilizado através do interface *DesignBuilder* no separador de AVAC, “*Earthtubes*”. Posteriormente após a validação foi feita uma análise do desempenho do sistema em cidades de Portugal e de que forma a instalação deste sistema de tubos enterrados seria ou não uma hipótese a considerar.

Para tal validação foi feita uma análise de sensibilidade numa cidade de Portugal ao longo de um ano, para perceber de que forma os vários parâmetros inerentes aos tubos variavam e qual o impacto que estes teriam na temperatura de saída dos tubos. Concluiu-se que para raios maiores dá-se uma maior diminuição da temperatura de saída dos tubos, principalmente quando as temperaturas são mais baixas como à noite, pois quando maior o raio maior vai ser a área de troca de calor entre o solo e o fluxo de ar que passa no tubo. A espessura do tubo também é um parâmetro tido em análise no entanto não se verificaram diferenças relevantes com a variação da mesma, sendo que é importante ter em atenção que embora a sua variação não seja relevante para a temperatura de saída do tubo esta tem uma importante acção de resistência mecânica e por isso considerar-se que espessuras muito reduzidas também possam não ser as mais aconselhadas. Para a variação do comprimento conclui-se que o aumento do comprimento não tem muito impacto pelo que o desempenho dos tubos é melhor com um comprimento mais pequeno, caso que se verifica também no que consta à profundidade sendo que a temperatura de saída é mais baixa para profundidades maiores vindo tendencialmente a aumentar, este factor

também está relacionado e é condicionado pelas características do tipo de solo da cidade de Bragança. Por fim quanto ao material utilizado verificam-se resultados mais eficazes para o material de condutividade térmica mais alta como é o caso do Aço, e neste caso também é importante ter em consideração a relação qualidade/preço.

Após a análise de sensibilidade, procedeu-se à validação do modelo “*Earthtube*” através da análise comparativa com quatro estudos, para condições e locais diferentes. No Caso de Estudo 1 e 3 pretendeu-se fazer uma análise ao desempenho dos tubos para o período de aquecimento e comparar resultados simulados pelo modelo com os resultados experimentais obtidos, obtendo-se um erro de 4,67 % no Caso de Estudo 1 e no Caso de Estudo 3 como foi feita uma análise para 4 dias de forma individual, 14 de Dezembro 2013, 29 de Dezembro de 2013, 7 de Janeiro de 2014 e 12 de Janeiro de 2014, o erro também foi calculado de forma individual sendo ele de 7 %, 23 %, 16 % e 0,046 %. No Caso de Estudo 2 e 4 foi feita uma comparação de resultados por *Benchmarking*, dado que os resultados obtidos nos estudos foram através de simulações através do *software EnergyPlus*. Foram feitas análises para um dia típico de Verão e para o ano inteiro, sendo o erro obtido de 5,9 % e no Caso de Estudo 4 não foi possível calcular dado que os valores em particular não foram disponibilizados, no entanto através da análise gráfica percebe-se um forte correlação entre os mesmos. Apesar de nem sempre os valores serem exactamente os esperados e estarem em perfeita consonância, o erro associado à comparação entre modelo é abaixo dos 10 % o que mostra que o programa revela ser consistente e viável para futuras análises. É importante ter em consideração os factores externos que podem ser uma condicionante nestes estudos, pois sabe-se que o clima é muito importante para o desempenho dos mesmos e por vezes o facto dos ficheiros climáticos não corresponderem exactamente ao mesmo ano de análise por exemplo pode ser um factor de risco para o sucesso da validação. Também a não utilização de soluções passivas, como o uso de persianas ou estores pode influenciar nos resultados obtidos.

Por fim foi realizada uma análise de forma a perceber de que forma os tubos enterrados influenciam a temperatura no interior de um edifício modelo, criado virtualmente no *DesignBuilder*. Estas cidades, entre elas Bragança, Porto e Beja foram escolhidas visto as suas características climáticas e a nível do solo serem bastante distintas, e como tal ter uma visão mais completada para o território nacional. Foi visível que quer para o Inverno quer para o Verão o sistema é eficaz conseguindo suprir as necessidades de aquecimento e arrefecimento. Verificou-se que a cidade onde o impacto dos tubos foi menor foi em Bragança, obtendo-se melhores desempenhos na cidade do Porto e Beja, sendo de salientar que o sistema é mais eficaz nos

meses de Verão. No entanto para ter uma melhor percepção da viabilidade deste sistemas quando utilizado em simultâneo com um sistema convencional, foi considerado um sistema AVAC “*VRF heating/cooling, plus DOAS with heat recovery*” através do qual se concluiu que o sistema em conjunto é mais eficaz em relação ao sistema de tubos enterrados no Inverno e mais eficaz relativamente ao sistema de AVAC nos meses de Verão, principalmente na cidade de Beja, o que leva a concluir que o sistema convencional quando associado a um sistema de tubos enterrados é mais eficaz para climas quentes na época de Verão. Foram ainda analisados os consumos para todos os sistemas e conclui-se que o sistema de AVAC+tubos apresenta os melhores consumos para a cidade de Beja, de 24254,20 kWh/ano, seguida de Porto e por fim Bragança. Se verificarmos o sistema só com tubos enterrados ou só com AVAC, estes apresentam um consumo menor, no entanto é importante verificar que os resultados para alguns casos, como Beja e climas quentes, podem ser compensados pois conseguem suprir as necessidades energéticas necessárias.

É então importante considerar todos estes factores. De uma forma geral conclui-se que os sistemas de ventilação por tubos enterrados são viáveis e eficazes, sendo o seu desempenho sempre condicionado por factores externos e portanto antes da instalação deve-se considerar uma análise de forma global a tudo o que é inerente ao edifício. Conclui-se que estes sistemas ainda não são capazes de ter um desempenho tão eficaz como o de um sistema convencional, no entanto revela-se um sistema viável e eficaz do ponto de vista ambiental, sendo as suas emissões de CO₂ consideravelmente mais baixas.

5.2 Trabalhos Futuros

Ao longo da tese foram encontradas algumas preocupações e questões que podem ser alvo de futura investigação e estudos futuramente no que conta aos sistemas de tubos enterrados. Sendo então seguidamente apresentadas algumas destas questões:

- Introdução de um separador dentro do módulo do “*EarthTube*” em que seja possível adicionar o número de tubos em análise;
- Realizar uma análise exergética de forma a estudar o tempo de vida do sistema;
- A confrontação dos resultados obtidos para o estudo em Portugal com dados resultantes de uma futura monitorização num edifício em estudo, para perceber se de facto os dados apresentados reproduzem a realidade de desempenho do sistema.

Referências Bibliográficas

- [1] Conselho Empresarial para o desenvolvimento sustentável - BCSD Portugal. Manual de Boas Práticas de Eficiência Energética 2005, Implementar o Desenvolvimento Sustentável nas Empresas. Coimbra; 2005.
- [2] Intergovernmental Panel of Climate Change - IPCC. Climate Change 2014, Synthesis Report. Summary for Policymakers. Suíça; 2014.
- [3] Enerdata, Intelligence + consulting. Global Energy Statistical Yearbook 2015. (<https://yearbook.enerdata.net/>)
- [4] Ministério da Justiça. Manual de Boas Práticas - Gestão Energética e de Água dos Edifícios dos Palácios da Justiça. Lisboa; 2011.
- [5] Direcção-Geral da Energia e Geologia. Energia em Portugal. Lisboa; 2014.
- [6] Directiva Europeia (94/3093) de 15 de Setembro 1994.
- [7] Aelenei D, Aelenei L, Santos F. Standard Unretrofitted Buildings and Net Zero-Energy Concept. Universidade Nova de Lisboa; 2010.
- [8] Leal V. Formação de Projectistas e Peritos SCE-RCCTE. Lisboa; 2007.
- [9] Decreto-Lei nº79/2006 de 4 de Abril do Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicação. Diário da República – I série-A, nº67; 2006.
- [10] Agência para a Energia – ADENE. Perguntas e Respostas sobre o RCCTE, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. Lisboa; 2009.
- [11] Agência para a Energia – ADENE. Perguntas e Respostas sobre o SCE, Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios. Lisboa; 2008.
- [12] Decreto- Lei nº118/2013 de 20 de Agosto do Ministério da Economia e do Emprego. Diário da República – 1ª série, nº 159; 2013.
- [13] Bernardo J. Estratégias para a Sustentabilidade Energética e Ambiental dos Territórios. Política Energética Nacional – desafios para 2020. Palmela; 2013.
- [14] Marszal A J, Heiselberg P. Zero Energy Building definition - a literature review, IEA SHC/ECBCS Task 40/Annex 52. Towards Net Zero Energy Solar Buildings; 2010.

- [15] Ascenso R. Nearly Zero Energy Buildings- O que vai mudar com os NZEB?. Edifícios e Energia, nº 201, p.6-p14; 2010.
- [16] Aelenei L, Gonçalves H, Rodrigues C. The roads towards “Zero Energy” in Buildings: Lessons learned from Solar XXI Building in Portugal. EuroSun 2010: International Conference on Solar Heating, Cooling and Building. Graz, Austria; 28 September – 1 October 2010.
- [17] Sartori I, Napolitano A, Marszal A, Pless S, Torcellini P, Voss K. Criteria for Definition of Net Zero Energy Buildings. Proceedings of EUROSUN 2010: International Conference on Solar Heating, Cooling and Building, Graz, Austria; 28 September – 1 October 2010.
- [18] International Energy Agency - IEA. Renewables for Heating and Cooling. França; 2007.
- [19] Zaki A, Almssad A. Cooling by underground earth tubes. 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century. Creta, Grécia; Setembro de 2007.
- [20] ENERGYPLUS. EnergyPlus Input and Output Reference – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, Version 6.0. The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regent of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA; 2010.
- [21] Meixel G, Bligh T. Earth Contact Systems—Final Report, prepared for the USA DOE, Underground Space Center, University of Minnesota and Massachusetts Institute of Technology; November 1983.
- [22] G. H. P. Consortium, <http://www.geoexchange.org/> ; 2005.
- [23] Ingersoll L, Zobel O, Ingersoll A. Heat Conduction With Engineering, Geological, and Other Applications Hardcover. University of Wisconsin Press; Revised edition; 1954.
- [24] Mostrel M, Givoni B. Windscreens in radiant cooling. Passive Solar Journal nº1, p. 229; 1982.
- [25] Penman H. Vegetation and hydrology - Technical Communication. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden Commonwealth Agricultural Bureaux, Farham Royal, nº 53, p. 124: 72 Tables. 20s; 1963.
- [26] Kusuda T, Achenbach P. Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States. National Bureau of Standards Gaithersburg MD, p. 233, EUA; Maio de 1965.

- [27] Technical Committee CEN/TC 156. EN 15241, Ventilation for buildings – Calculation methods for energy losses due to ventilation and infiltration in commercial buildings; 2006.
- [28] Santamouris M, Kolokotsa D. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings*, v. 57, p. 74-94; Fevereiro de 2013.
- [29] Santamouris M, Lefas C. Thermal analysis and computer control of hybrid greenhouses with subsurface heat storage. *Energy in Agriculture*, v. 5, p. 161-173; Julho de 1986.
- [30] Bojic M, Papadakis G, Kyritsis S. Energy from a two-pipe, earth-to-air heat exchanger. *Energy*, v.24, i.6, p.519–523; Junho 1999.
- [31] Hollmuller P. Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. Thèse de doctorat, p. 125. Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie - Université de Genève, Genève; 2002.
- [32] Trombe A, Serres L. Air- Earth exchanger study in real site experimentation and simulation. *Energy and Buildings*, v. 21, i. 2, p.155-162; 1994.
- [33] Gauthier C, Lacroix M, Bernier H. Numerical simulation of soil heat exchanger- storage systems for greenhouses. *Solar Energy*, v. 60, i. 6, p. 333-346; 1997.
- [34] Pfafferott J. Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardized method to calculate energy efficiency. *Energy and Buildings*, v. 35, i. 10, p. 971-983; 2003.
- [35] Aschehoug O, Perino M. IEA ECBCS Annex 44 Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings Expert Guide – Part 2 Responsive Building Elements; 2009.
- [36] Jeong Y, Haghighat F. Modeling of a Hybrid-Ventilated Building – Using ESP-r. *International Journal of Ventilation*, nº1, p.127–140; 2003.
- [37] Zimmermann M, Remund S, IEA-ECBCS Annex 28 Subtask 2 Report 2. Low Energy Cooling – Technology Selection and Early Design Guidance. *Construction Research Communications*, p. 95–109; 2001.

- [38] Santamouris M, Argiriou A, Vallindras M. Design and operation of a low energy consumption passive solar agricultural greenhouse. *Solar energy*, v.52, i.5, pp.371–378; 1994.
- [39] Bernier H, Raghavan G, Paris J, Evaluation of a soil heat exchanger storage system for a greenhouse, Part I. System performance, *Canadian Agricultural Engineering*, v.33, i.1, pp. 93–98; 1991.
- [40] Ozgener O, Ozgener L. Determining the optimal design of a closed loop earth to air heat exchanger for greenhouse heating by using exergoeconomics. *Energy and Buildings*, v.43, i.4, pp. 960–965; 2011.
- [41] Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE. Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa Energyplus – Versão 8.0. Florianópolis; 2013.
- [42] Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE. Apostila do curso básico do programa Energyplus. Florianópolis; 2013.
- [43] Energyplus. Getting started with EnergyPlus. Illinois: University of California; 2013.
- [44] Energyplus. Energyplus Engineering Reference. Illinois: University of California; 2013.
- [45] Mustafa A. Ground-source heat pumps systems and applications “Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 12, pp. 344-371;2008.
- [46] DesignBuilder software. DesignBuilder 2.1 - user’s manual; Outubro de 2009.
- [47] Manual Energyplus. Modelo Earthtube
- [48] ASHRAE - American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. ASHRAE: Handbook – HVAC Applications, SI Edition, Atlanta, USA; 2007.
- [49] Lee K H, STRAND R K. Implementation of an Earth Tube System into EnergyPlus Program. Proceedings of SimBuild, MIT, Cambridge, Mass; 2006.

[50] Horbach C S. Estudo de Sistemas de Ventilação por Tubos Enterrados. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre; 2010.

[51] Rasha S. Performance Analysis of na Earth Tube Heat Exchanger for Winter Heating in Erbil. International Journal of Scientific and Engineering Research, v. 5, i. 3, pp 1321-1332; Março de 2014.

[52] www.Climate-data.org

[53] Sharan G, Jadhav R. Performance of single pass earth-tube heat exchanger: an experimental study. Coordinator Cummins – IIMA Lab Centre for Mgt in Agriculture, Indian Institute of Management, Ahmedabad; 2003.

[54] Lee K, Strand R. Implementation of an earth tube system into energyplus program. University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign, IL; Janeiro de 2006.

[55] Bisoniya T S, Kumar A, Baredar P. Heating potencial evaluation of earth-air heat exchanger system for winter season. Journal of Building Physics, pp. 1-19; Julho de 2014.

[56] Alaidroos A, Krarti M. Evaluation of Passive Cooling Systems for Residential Buildings in the Kingdom of Saudi Arabia. Journal of Solar Energy Engineering, v. 138; Junho de 2016.

[57] Ferreira A. LNEG- Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Caracterização de Portugal Continental, cap.2, pp. 19-61; 2000.

[58] www.ipma.pt

[59] LNEG- Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Caracterização dos Solos, cap.5, pp. 81-94; 2000